

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

На правах рукописи

АЛЕКСЕЕВ ДАНИИЛ АНДРЕЕВИЧ

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ВАКУУМНОГО ШАХТНОГО ГАСИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ**

Специальность 2.1.6 – Гидротехническое строительство, гидравлика и
инженерная гидрология

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Ханов Нартмир Владимирович

Москва – 2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ГАСИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ШАХТНЫХ ВОДОСБРОСОВ И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТНОГО ОБОСНОВАНИЯ...	10
1.1. Условия применения шахтных водосбросов.....	10
1.2. Классификационные признаки шахтных водосбросов и конструкции шахт...	11
1.3. Конструкции колен и других устройств.....	19
1.4. Конструкции отводящих туннелей и их концевых участков.....	20
1.5. Вакуум и его значение для элементов конструкции высоконапорного шахтного водосброса.....	20
1.6. Используемые в настоящее время методы гашения энергии сбросного потока высоконапорных гидроузлов.....	23
Выводы по главе	31
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОТЫ ВАКУУМНОГО ГАСИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ШАХТНЫМ ВОДОСБРОСАМ.....	33
2.1. Теоретическое обоснование параметров конструкции шахтного гасителя энергии потока.....	34
2.2. Теоретическое обоснование работы вакуумного шахтного гасителя энергии.....	57
2.2.1. Влияние гидростатического давления воды и температуры на предельную концентрацию газов в условиях вакуума.....	56
2.2.2. Теоретическое обоснование вакуумного гасителя энергии.....	57
Выводы по главе	73
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ШАХТНОМ ВОДОСБРОСЕ	74
3.1. Цели и задачи экспериментальных исследований.....	75
3.2. Объект и предмет исследования.....	75

3.3. Основы теории подобия.....	76
3.4 Описание лабораторной установки и физической модели.....	77
3.4.1. Конструкция модели.....	80
3.4.2. Система подачи воздуха.....	80
3.4.3. Конструкции затворных камер.....	84
3.5. Средства измерений и пьезометрирования.....	86
3.5.1. Конструкция пьезометров.....	86
3.5.2. Размещение пьезометров на модели.....	86
3.6. Методика проведения экспериментов и обработки данных.....	89
3.6.1. Программа экспериментов.....	89
3.6.2. Порядок проведения измерений.....	91
3.6.3. Обработка экспериментальных данных.....	91
3.7. Оценка погрешности эксперимента.....	93
Выводы по главе	94
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ДВУХЭТАПНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ШАХТНОГО ГАСИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ.....	95
4.1. Общая характеристика и программа исследований.....	95
4.2. Первый этап исследований — тестовые испытания модели.....	95
4.3. Второй этап исследований.....	100
4.4. Работа шахтного гасителя при маневрировании затворами.....	102
4.5. Уточнение параметров шахтного гасителя энергии.....	117
4.6. Исследование шахты с колодцем.....	125
4.7. Распределение давления по высоте ствола шахты.....	136
4.8. Распределение давления по длине отводящего туннеля.....	141
Выводы по главе	144
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	146
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	150
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	160

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований. С развитием цивилизации происходит всё большее потребление энергии, особенно электрической. Альтернативой традиционных способов получения энергии является использование возобновляемых источников энергии, к которым относятся гидравлическая энергия рек.

В современных крупных высоконапорных и средненапорных гидроузлах (с напорами больше 50 метров) стоимость энергогасящих сооружений достигает до 39 – 40% от стоимости строительства всего гидроузла. При этом не всегда удаётся обеспечить его 100% надёжность даже при строительстве гидроузла на скальных грунтах. Поэтому задача повышения надёжности работы энергогасящих сооружений в современном гидростроительстве выходит на первый план, что требует разработки новых концепций гашения энергии. Одним из путей решения данной проблемы является разработка конструкций дополнительных гасителей энергии, устраиваемых на различных возможных участках водопропускного тракта, где за счёт дробления струи и перемешивания может быть достигнута значительная эффективность гашения энергии потока. При этом одновременно может быть решена и проблема повышения надёжности работы энергогасящих элементов водосбросных сооружений, что, вкупе со снижением затрат на их возведение, является актуальной.

Степень разработанности темы исследований. Результаты разработки и исследования технических решений для шахтно-туннельных водосбросов, гашения избыточной энергии потока на водопропускном тракте гидротехнических объектов изложены в ряде работ отечественных и зарубежных ученых, среди них: О.Ф. Васильев, Б.Е. Веденеев, Г.И. Кривченко, И.И. Леви, Ю.А. Ибад-заде, А.Д. Альтшуль, Н.А. Картвелишвили, В.Н. Мелентьев, Н.П. Розанов, А.Т. Кавешников, И.С. Румянцев, А.П. Мордасов, А.П. Гурьев, Д.В. Козлов, Н.В. Ханов, В.В. Волшаник, Г.В. Орехов, К.П. Моргунов, А.И. Есин, А.П. Войнович, Н.С. Знаменская, Г.В. Аранович, И.А. Кузнецов, А.Г. Жиленков,

А.М. Прудовский, О.А. Муравьев, Г.В. Воробьев, М.Я. Бухаров, Н.Н. Рзанова, Н.Т. Кавешников, W.E. Wagner, E.R. Dodge, J.N. Bradley, H. Rouse и др.

Обзор научной литературы показал, что до настоящего времени вопросам изучения поведения потока воды в условиях вакуума обращалось мало внимания, поэтому не известны и законы, определяющие характер ситуации, складывающейся в водопропускном тракте при его наличии. Конструкции вакуумных шахтных гасителей энергии требуют комплексного экспериментального исследования и оценки.

Цель и задачи исследования. Цель настоящей работы заключается в разработке и исследовании нового технического решения в виде вакуумного шахтного гасителя энергии потока в закрытом водосбросе.

Задачи исследования:

- провести анализ опыта использования водопропускного тракта гидротехнических объектов для гашения избыточной энергии потока при закрытых водосбросах;
- предложить теоретическое обоснование работы вакуумного шахтного гасителя энергии, оборудованного механическими затворами;
- создать физическую модель шахтного гасителя энергии, разработать лабораторно-инструментальную базу и методику исследований движения жидкости в пределах водопропускного тракта;
- провести модельные гидравлические исследования варианта вакуумного шахтного гасителя энергии с горизонтальной затворной камерой, с изучением работы узла сопряжения шахты с туннелем как при сопряжении «дно в дно», так и с цилиндрическим гасителем, устраиваемого в колене шахты;
- выполнить анализ полученных результатов и привести рекомендации о возможности применения на практике предложенного вакуумного шахтного гасителя энергии.

Научная новизна работы:

- расширена возможность применения шахтного гасителя энергии в гидротехническом строительстве, доказана возможность использования вакуума в шахте водосброса для диссипации энергии потока;
- теоретически обоснована работа вакуумного шахтного гасителя энергии, оборудованного механическими затворами;
- на физической модели экспериментально изучено, в широком диапазоне изменения пропускаемых расходов, распределение давления по высоте ствола шахты и в отводящем туннеле;
- предложена система удаления воздуха из туннеля с подтверждением исключения залпового выброса воздуха в водоводе с обратным уклоном;
- установлены режимы работы узла сопряжения шахты с туннелем как при сопряжении «дно в дно», так и с устройством заглублённого цилиндрического гасителя в колене шахты. Доказано, что именно продление шахты ниже дна входного сечения туннеля позволяет улучшить гидравлический режим в отводящем туннеле и отказаться от демпфирующего сопротивления в виде диафрагмы, установленной за входным сечением туннеля.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные расчетные зависимости растворения газов в жидкости в соответствии с законами Дальтона, Генри, Бойля-Мариотта, расхода от относительной глубины воды в туннеле, критического уклона от расхода и диаметра туннеля, кавитационной прочности бетона от скорости воды в туннеле, расчетное обоснование выбора уклона отводящего водовода, а также экспериментальные результаты работы модели при разном конструктивном оформлении и разных режимах позволяют выполнить расчет и обоснование конструкции шахтно-туннельных водосбросных сооружений гидроузлов.

Основные положения исследований вакуумного шахтного гасителя энергии, представленные в диссертационной работе, доказали свою эффективность на модельных испытаниях в ходе проектирования Рогунской ГЭС. Результаты исследования и расчётные зависимости были использованы АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» имени С.Я.

Жука» при разработке конструкций гасителей энергии потока водосбросных сооружений Рогунской ГЭС (представлен Акт о внедрении результатов научных исследований).

Методология и методы исследования. Основой методики моделирования и проведения модельных гидравлических исследований вакуумного шахтного гасителя энергии является моделирование по Фрудру. Гашения энергии потока в шахте изучено для трёх режимов: со свободным доступом воздуха в шахту; без доступа воздуха в шахту; с дозированной подачей воздуха в шахту в соответствии с возможным количеством его выделения из воды. Отводящий туннель, принятый с обратным уклоном для исключения залпового выброса воздуха, исследован с диафрагмой на входе и без её установки. Изучена работа узла сопряжения шахты с туннелем как при сопряжении «дно в дно», так и с цилиндрическим гасителем в виде глубокого водобойного колодца, устраиваемого в колене шахты. Обработка экспериментальных данных выполнялась на основе существующих теорий и методик гидравлики и гидротехники.

Личный вклад автора заключается: в получении результатов, изложенных в диссертации; в реновации физической экспериментальной модели; выборе направления исследования и формулировании проблемы; определении цели и задач работы; разработке методики исследований; в организации и проведении лабораторных опытов и обработке экспериментальных данных; апробации результатов исследований на международных и всероссийских научно-практических конференциях; подготовке основных публикаций и диссертационной работы. Сбор данных, теоретическое обоснование и статистическая обработка полученных данных по теме диссертации проведены лично соискателем.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты обзора предыдущих исследований гашения избыточной энергии потока в шахте закрытого водосброса;
- теоретическое обоснование вакуумного гасителя энергии с изучением законов растворимости газов в жидкости;

- результаты экспериментов по определению распределения гидродинамического давления по длине водопропускного тракта водосброса как при наличии диафрагмы на входе в отводящий участок туннеля, так и при свободном входе;

- анализ работы модели шахтного вакуумного гасителя энергии при разных режимах, как с подачей воздуха, так и при его отсутствии, в широком диапазоне изменения расходов и разном конструктивном оформлении узла сопряжения шахты с туннелем;

- общие выводы по результатам анализа эффективности гашения энергии в шахтно-туннельном водосбросе.

Степень достоверности работы. При проведении модельных гидравлических исследований использовались современные приборы, оборудование и методики по определению воздействия потока на сооружение, оценки его кинематических и динамических характеристик. Обработка полученных опытных данных проводилась с помощью известных программных комплексов, полученные результаты сопоставлялись с данными других авторов и проектными решениями. При проведении исследований использовались нормативные документы в области строительства.

Апробация результатов. Основные положения и результаты исследований докладывались на заседаниях кафедры гидротехнических сооружений РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, а также на научных конференциях и семинарах: Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства. НИУ МГСУ, Москва, 24 мая 2023 г.; Материалы международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича. РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, 2024 г.; Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 160-летию Тимирязевской академии. Москва, 02–04 июня 2025г.; Всероссийской с международным участием научной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 155-летию со дня рождения выдающегося учёного в области животноводства, академика ВАСХНИЛ Михаила Фёдоровича

Иванова. РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, 27-29 апреля 2026 г.; VI Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Инновационные технологии и повышение эффективности производственных процессов в сфере строительства, природообустройства и агроинженерии». КБГАУ имени В.М. Кокова, Нальчик, 05 июня 2026 г.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 8 печатных работах, из которых 3 опубликованы в научных периодических изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства высшего образования и науки РФ.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (111 источников, из них 12 на иностранном языке) и приложения. Диссертация изложена на 161 страницах, содержит 102 рисунка и 4 таблицы.

ГЛАВА 1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ГАСИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ШАХТНЫХ ВОДОСБРОСОВ И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТНОГО ОБОСНОВАНИЯ

1.1. Условия применения шахтных водосбросов

Шахтные водосбросы относят к типу поверхностных водосбросов, их устраивают вне тела плотин. Эти водосбросы служат постоянными эксплуатационными сооружениями речных гидроузлов. Для отводящего тракта водосбросов используют, как правило, временные строительные водоводы (туннели, трубы), которые с водозаборной воронкой соединяются вертикальной шахтой [19, 66].

Условия для применения шахтных водосбросов определяют следующие благоприятные факторы.

1. Наличие скальных ущелий с крутыми склонами, когда устройство других типов водосбросов менее удачно; возможность создания в скале удобной площадки для кольцевого водослива.
2. Наличие строительного водовода в берегах или в основании плотины.
3. Величины сбросных расходов в период эксплуатации гидроузла примерно до $5\,000\text{ м}^3/\text{с}$ и напоры примерно до 100 м.
4. Наличие в гидроузле плотин из местных материалов. Относительная длина (отношение длины участка строительного туннеля, используемого для отводного тракта водовода, по отношению к высоте плотины представлены в таблице 1.1) строительных туннелей в таких гидроузлах наибольшая, экономическая целесообразность устройства шахтных водосбросов в этих условиях увеличивается [36, 66].

Большинство шахтных водосбросов (в мире их известно более 60 шт.) построено в гидроузлах с плотинами из местных материалов; применение их оказалось рационально так же и в гидроузлах с арочно-гравитационными, контрфорсными и другими типами плотин [43, 66, 107, 108].

Таблица 1.1 - Относительные длины строительных туннелей

Типы плотин	Средняя	Максимальная	Минимальная
Земляные укатанные	8,28	19,30	3,80
Каменнонабросные и каменно-земляные	5,47	13,30	2,69
Железобетонные (контрфорсные и многоарочные)	3,94	6,32	2,43
Бетонные массивные на скальном основании	3,55	4,61	2,43
Бетонные арочные	2,77	4,03	1,72

1.2. Классификационные признаки шахтных водосбросов и конструкции шахт

Главной отличительной особенностью шахтного водосброса является вертикальная (реже наклонная) шахта, увеличенная водосливной воронкой того или иного профиля и формы в плане. Конструктивные различия в устройстве шахт определяют следующие типы водосбросов:

1. Шахтный - ствол шахты получен выработкой скальной породы; бетонная облицовка ствола обязательна (рисунок 1.1).

2. Шахтно-башенный - ствол шахты получен частично выработкой скальной породы и частично образован в бетонной или железобетонной башне (рисунок 1.2).

3. Башенно - шахтный - ствол шахты и колено, которым он соединяется с отводящей галереей, полностью образованы бетонной башней той или иной конструкции (рисунок 1.3).

Классическим типом высоконапорного шахтного водосброса можно считать водосброс гидроузла Оахи, построенный в начале 30-х годов (XX в.) в США, подобная конструкция вполне современна (рисунок 1.4). Можно оценить

удобство водосбросов башенного типа при возведении земляных плотин в две очереди - по проекту Жевлинковского гидроузла в Чехословакии [61, 66, 79, 95].

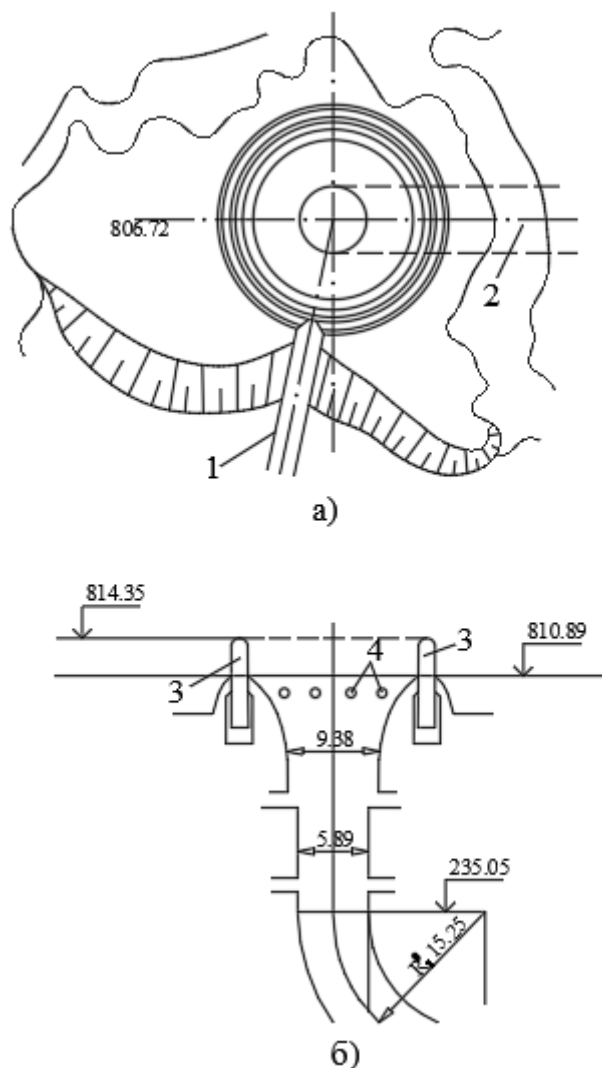


Рисунок 1.1 - Высоконапорный шахтный водосброс плотины Оахи в США

а - план водосброса; б - разрез по водосбросу: 1 - раздельный противоводоворотный бычок; 2 - отводящий туннель; 3 - кольцевой затвор высотой 3.66 м диаметром по гребню 18.3 м; 4 - отверстия для подвода воздуха под струю

Башни шахтных средненапорных водосбросов можно размещать и на плотных скальных породах в основании, как это сделано в гидроузле на р. Аконгтиен в Англии [10, 66, 70].

В практике гидротехнического строительства встречаются конструкции водосбросов, которые лишь условно могут быть отнесены к типу шахтных водосбросов. К таким конструкциям, например, можно отнести шахтный

водосброс, построенный в США в 1929 г. при многоарочной плотине Биг Дальтон (рисунок 1.5), неполная круговая водосливная воронка этого водосброса совмещена с гребнем крайней арки плотины; шахта и отводящий водовод соединяются с открытым каналом [41, 72, 74].

По условиям эксплуатации шахтные водосбросы разделяют на нерегулируемые - автоматически действующие и регулируемые с затворами на гребне водосливных воронок. Большинство из построенных водосбросов нерегулируемы.

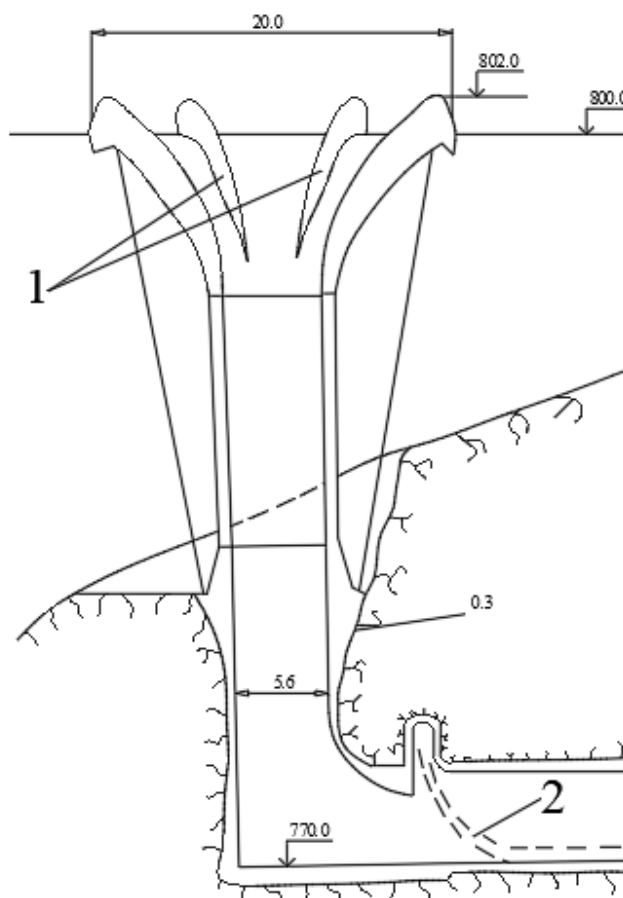


Рисунок 1.2 - Шахтно-башенный водосброс плотины Понтези в Италии

1 - противоводоворотные ребра; 2 - воздухоподводящая труба

По условиям эксплуатации шахтные водосбросы разделяют на нерегулируемые - автоматически действующие и регулируемые - с затворами на гребне водосливных воронок. Большинство из построенных водосбросов нерегулируемы.

Гребень водосливов автоматически действующих шахтных водосбросов располагают на отметке НПУ водохранилища. Пропуск паводковых расходов через нерегулируемые водосбросы вызывает форсировку уровня, что не всегда возможно из-за нежелательных затоплений территорий в верхнем бьефе и не всегда экономически целесообразно из-за удорожания подпорных сооружений. Вот почему при сбросных расходах, примерно более $700 \text{ м}^3/\text{сек}$, на гребнях водосливов устанавливают затворы. Последнее обстоятельство приводит к возрастанию стоимости самих шахтных водосбросов [49, 55, 66, 82].

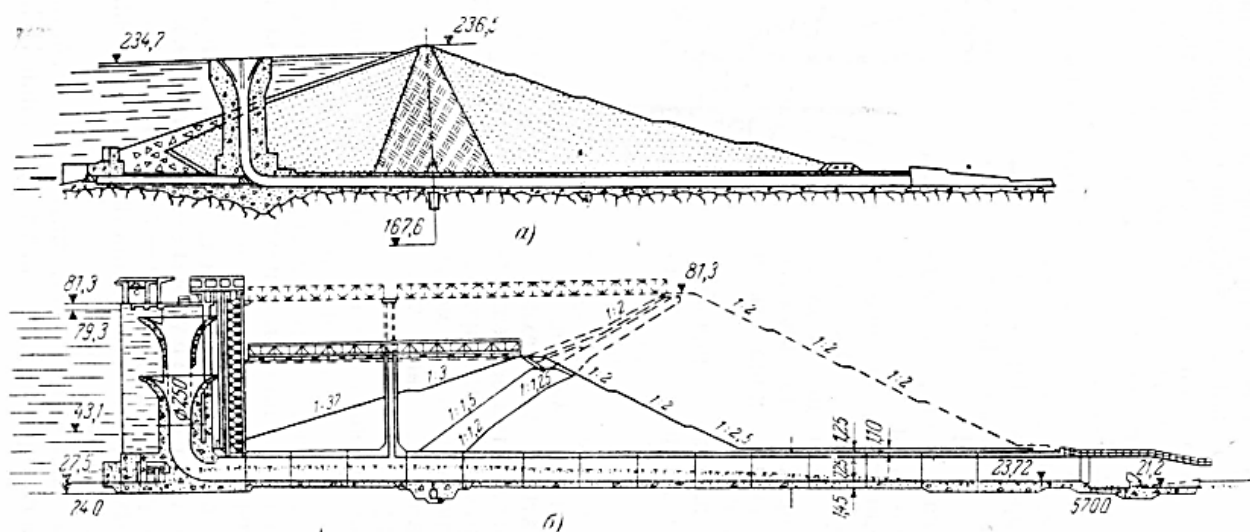


Рисунок 1.3 - Высоконапорные шахтные водосбросы плотин

а - Айер Итэм, в Малайской федерации; б - на р. Желивка в Чехословакии

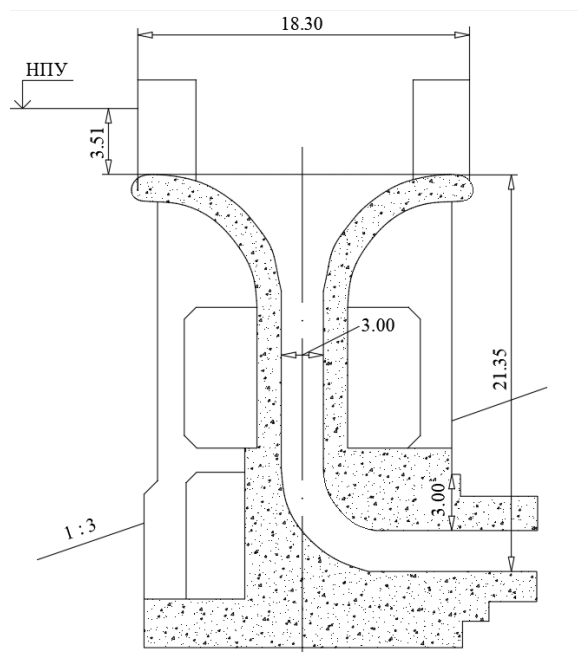


Рисунок 1.4 - Шахтный водосброс плотины Аконгтиен (Англия)

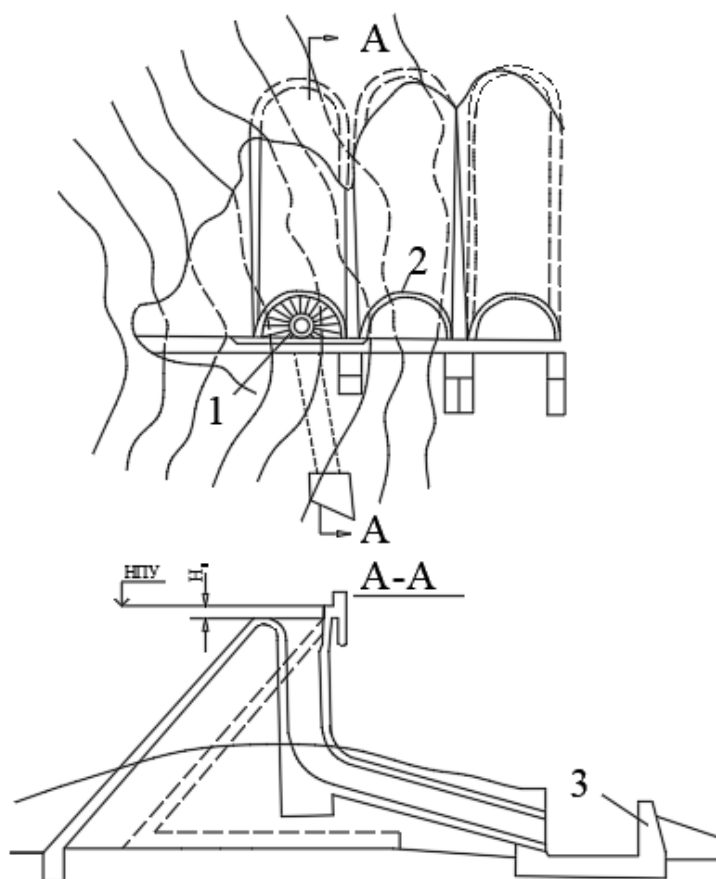


Рисунок 1.5 - Шахтный водосброс совмещённого типа плотины Биг Дальтон
в США:

1 - неполная круговая воронка; 2- верхняя часть арки; 3 - отводящий лоток

Конструктивные решения водосливных воронок шахтных водосбросов могут обеспечивать поступление потока в шахту без его закручивания; шахта при профилирующих напорах на гребне и расчетных величинах сбрасываемых расходов работает в напорном режиме; поток при высоких напорах входит в горизонтальные туннели с высокими скоростями (более 50 м/сек); в отводящем тракте возможно возникновение вакуума и кавитации [40, 63, 66].

Параметры и элементы шахтных водосбросов показаны на рисунке 1.6.

Шахтные водосбросы по напору разделяют [52, 78, 79] на:

- высоконапорные - с максимальным напором более 50 м;
- средненапорные - с максимальным напором 15-50 м;
- низконапорные - с максимальным напором менее 15 м.

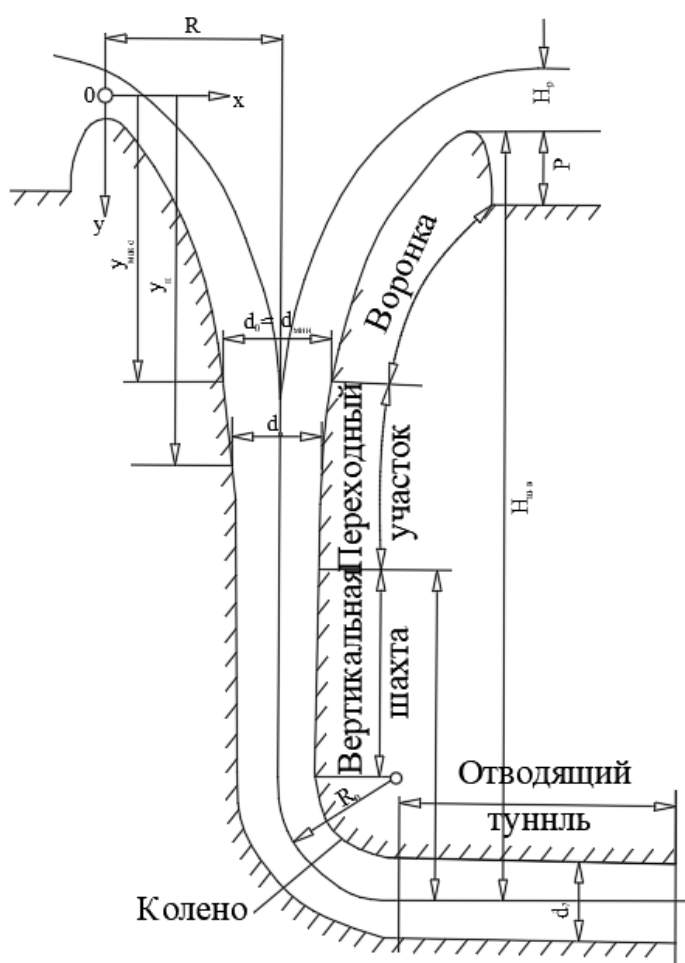


Рисунок 1.6 - Основные элементы конструкции шахтного водосброса

В числе сооружений гидроэнергоузла Менжил, построенного в 1959-1963 гг. на р. Сефид-Руд в Иране, имеется два шахтных водосброса (рисунок 1.7) с неполными кольцевыми водосливами. Максимальный паводковый расход для реки был определен в $5000 \text{ м}^3/\text{сек}$; через глубинный водовыпуск и гидростанцию в период паводка сбрасывается $440 \text{ м}^3/\text{сек}$ ($320+120 \text{ м}^3/\text{сек}$, соответственно) [66, 86]. Было признано целесообразным часть паводка аккумулировать в водохранилище при форсировке его уровня на 4,4 м относительно НПУ; таким образом, максимальный пик расхода срезался до $3240 \text{ м}^3/\text{сек}$ и через каждый шахтный водосброс пропусклось $1400 \text{ м}^3/\text{сек}$. [47]. В данном случае проектировщики сочли более рациональным нарастить плотину (гребень контрфорсной плотины на 6,7 м поднять выше НПУ) и устроить нерегулируемые шахтные водосбросы. Применение водосбросов с затворами позволило бы несколько уменьшить высоту плотины [26, 33, 44].

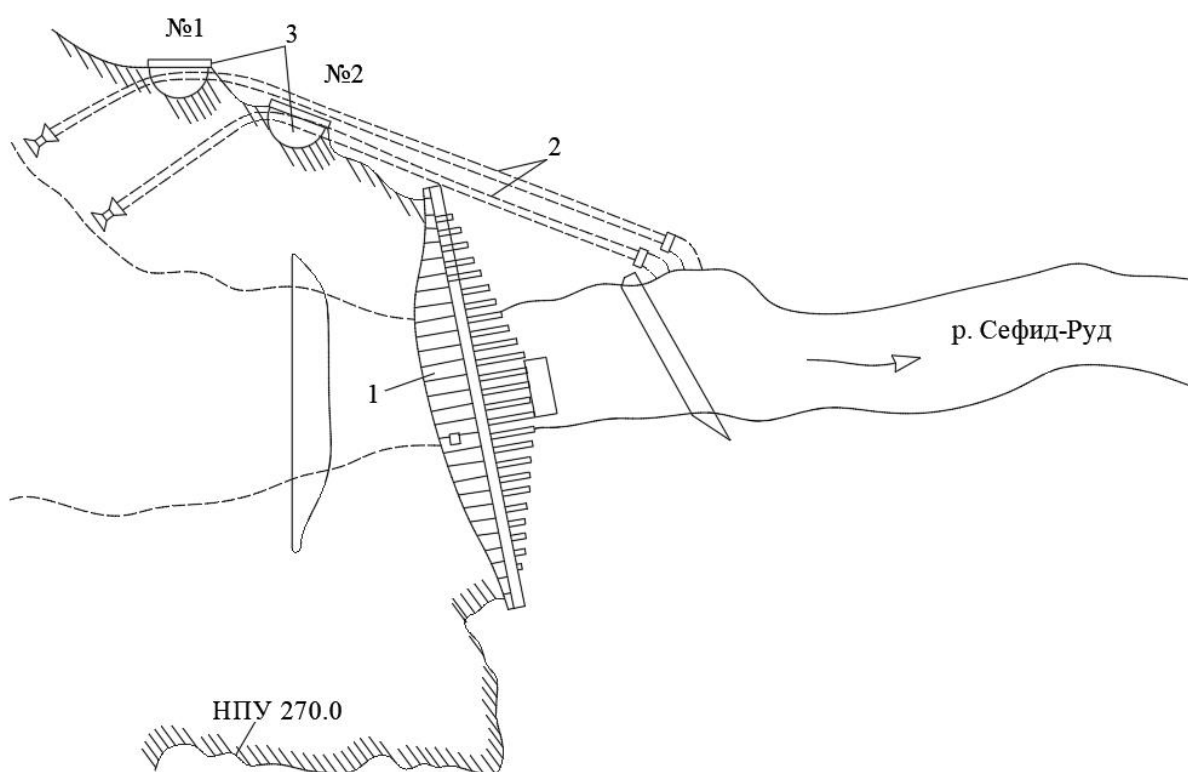


Рисунок 1.7 - План гидроузла Менжил в Иране

1 - массивно-контрфорсная плотина 2 - строительные туннели 3 - воронки шахтных водосбросов

Три нерегулируемых шахтных водосброса (рисунок 1.8) с полными кольцевыми воронками эксплуатируются в гидроузле Санта Валентина в Италии. Напорный фронт гидроузла образован земляной плотиной высотой 34,3 м, суммарный расход через водосбросы составляет 800 м³/сек [66, 92].

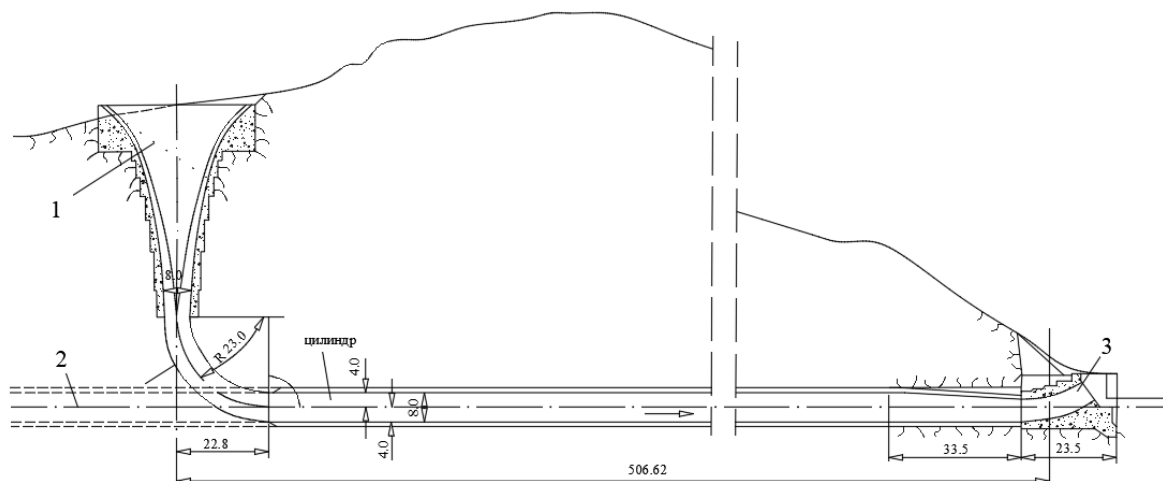


Рисунок 1.8 - Нерегулируемый водосброс плотины Санта Валентина в Италии.

1 - воронка шахтного водосброса, 2 - строительный туннель, 3 - гаситель на
концевом участке

В водохранилищах, используемых для борьбы с наводнениями, глубины над водосливами нерегулируемых шахтных водосбросов достигают 12,2 м и 16,35 м (водосбросы Шайд Хилл и Харт Бьют в США) [31, 32, 66].

Для регулируемых шахтных водосбросов применяют затворы: плоские, сегментные - с механическим подъемом, цилиндрические - кольцевые и секторные - поплавкового типа. При выборе типа предпочтение следует отдавать затворам без подъемных механизмов (рисунок 1.9) [22, 23, 35, 90].

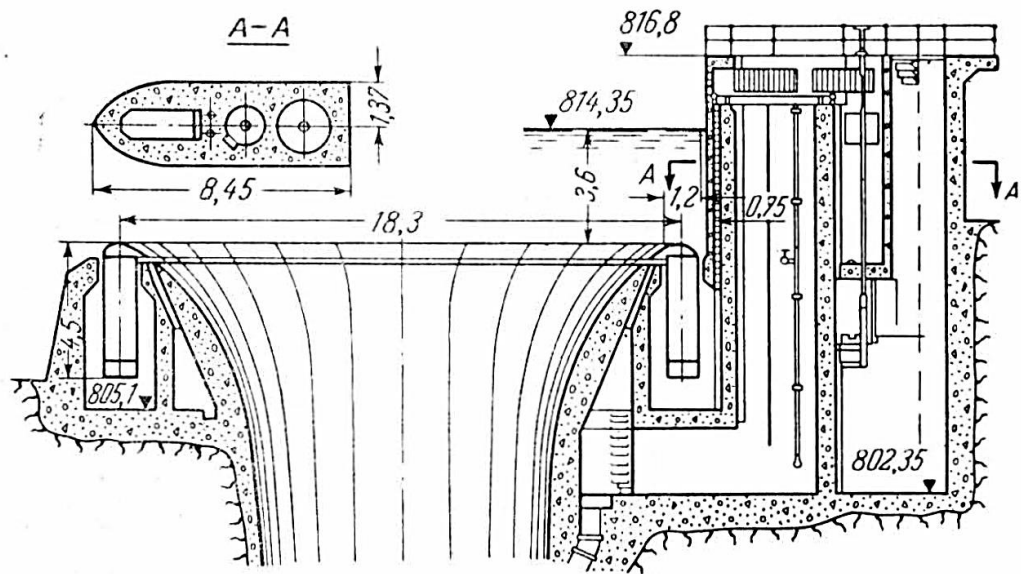


Рисунок 1.9 - Кольцевой затвор высоконапорного шахтного водосброса плотины Оахи в США

Преимуществом цилиндрических затворов является относительно малый вес на единицу площади водосливного отверстия, небольшое подъемное усилие, отсутствие подвижных частей и автоматичность действия. Кроме того, оголовки (водосливные воронки) шахтных водосбросов при таких затворах обычно получаются более компактными [1, 8, 10, 66].

1.3. Конструкции колен и других устройств

Для соединения вертикальных шахт с отводящими туннелями применяют колена, обеспечивающие плавный поворот потока под углом около 90° при вертикальных шахтах или поворот под углом около 135° и более при шахтах наклонных. Встречаются конструкции водосбросов с неплавным соединением шахты с отводящим туннелем, например, в высоком напорном шахтном водосбросе Понтези, построенном в Италии в 1957 г.

Колена, как правило, на всей длине имеют постоянные круговые поперечные сечения. Однако при сопряжении цилиндрической шахты с

отводящим туннелем меньшего диаметра можно прибегать и к устройству сужающегося колена [66].

1.4 Конструкции отводящих туннелей и их концевых участков

В построенных и строящихся шахтных водосбросах наибольшее распространение нашли туннели круглого поперечного сечения. Уклоны их обычно определяются уклонами дна реки и находятся в большинстве случаев в пределах от 0 до 0,005.

Устройство на трассе туннеля более или менее крутых поворотов не желательно, особенно в туннелях круглого поперечного сечения, работающих с большими скоростями, из-за возможности отрыва потока от стенки туннеля на поворотах; при этом может образовываться «пробковое движение» движение воды с резким изменением давления в туннеле. С этой точки зрения, например, в гидроузле Менжил удачно расположен правый шахтный водосброс и менее удачно - левый (сразу за его шахтой туннель искривлен на участке, где будут наибольшие скорости) [34, 66, 110].

1.5 Вакуум и его значение для элементов конструкции высоконапорного шахтного водосброса

При движении потока воды через шахтный высоконапорный водосброс, при гидравлических условиях, отличных от профилирующих, в водопроводящем тракте может возникнуть вакуум. Места возможного образования вакуума показаны на рисунке 1.10. К эффективным зонам для работы водосброса относят зону вакуума на поверхности воронки (рисунке. 1.10, а) при условии допустимой его величины [93, 94]. В этом случае вакуум увеличивает пропускную способность водосброса. Зоны вакуума, (показанные на рисунке 1.10 б не являются полезными и его (их) следует избегать [14, 15, 20, 27, 66].

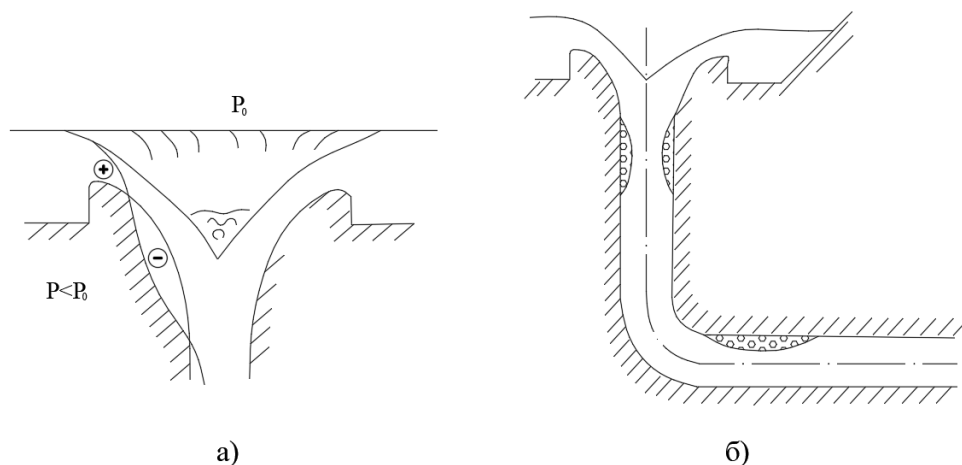


Рисунок 1.10 - Виды вакуумных зон в тракте высоконапорного шахтного водосброса:

а - при безотрывном обтекании водосливной поверхности воронки;

б - при протекании потока с отрывом струи от поверхности и с образованием вихревой зоны

Допустимые величины вакуумов могут быть приближенно определены по формуле Н. П. Розанова [100, 102, 101, 105, 111]:

$$(h_{\text{вак}})_{\text{доп}} = \frac{P_0}{\gamma} - \frac{P_d}{\gamma} - \delta_0 * \frac{v^2}{2g}, \quad (1)$$

Где: $(h_{\text{вак}})_{\text{доп}}$ - допустимый осреднённый по времени вакуум, м. вод. ст.;

$\frac{P_0}{\gamma}$ - атмосферное давление, м. вод. ст.;

$\frac{P_d}{\gamma}$ - парциальное давление водяных паров, м. вод. ст.;

v - скорость протекания воды над зоной вакуума;

g - ускорение свободного падения, м/сек²;

δ_0 - коэффициент, равный 0,1 (при безотрывном обтекании потоком поверхностей; при наличии в шахте цилиндрического участка δ_0 может повыситься, если будет отрывное обтекание поверхностей) [14, 17, 27, 73, 75];

$$(h_{\text{вак}})_{\text{макс}} < (h_{\text{вак}})_{\text{доп}}, \quad (2)$$

По рекомендации в [83, 84, 88, 89, 90] сооружениях не следует допускать вакуум порядка 7,5-8,5 м вод. ст., при этой величине вакуума роль растворенного воздуха в потоке невелика и с ней можно не считаться.

Изучение вакуума на водосливных воронках эллиптического профиля показало, что водосливные воронки с эллиптическими профилями при профилирующем напоре H_p работают без вакуума и с коэффициентами расхода, практически равными, как и в случае очертания их по А. Н. Ахутину [63, 65, 66]. При меньших напорах, обычно при расходах $Q = (0,75-0,85) Q_p$, незначительной величины вакуумы ниже гребня имеют место и на эллиптических профилях. Однако, как правило, абсолютные величины их в 2-3 раза меньше, чем в воронках, очерченных по А. Н. Ахутину (рис. 1.11) [50, 64, 66, 80, 81, 87].

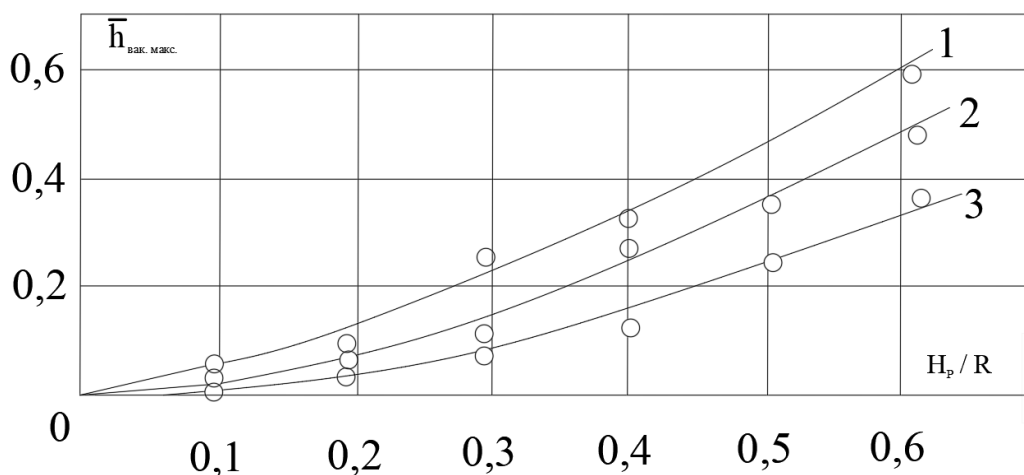


Рисунок 1.11 - Графики $(h_{\text{вак}} = \frac{(h_{\text{вак}})_{\text{макс}}}{H_p} = I(\frac{P_p}{R})$ для полных круговых водосливных воронок с различным очертанием водосливных поверхностей
1 – по А.Н. Ахутину; 2 - по координатам В.Е. Вагнера; 3 - по эллипсу П.П. Мойса

Коэффициенты вакуумности воронок $k_{\text{вак}} = \frac{(h_{\text{вак}})_{\text{макс}}}{H_p}$ (где $(h_{\text{вак}})_{\text{макс}}$ осреднённый во времени вакуум при расходе $Q = (0.75 \dots 0.85) * Q_p$; H_p - расчётный напор) увеличивается в зависимости от отношения $\frac{b_i}{b_{\text{макс}}}$; где $b_{\text{макс}}$ — толщина водосливного профиля воронки на уровне её минимального поперечного

сечения (рис. 1.12), и при этом закономерности этого увеличения практически не зависят от $\frac{H_p}{R}$ [20, 21].

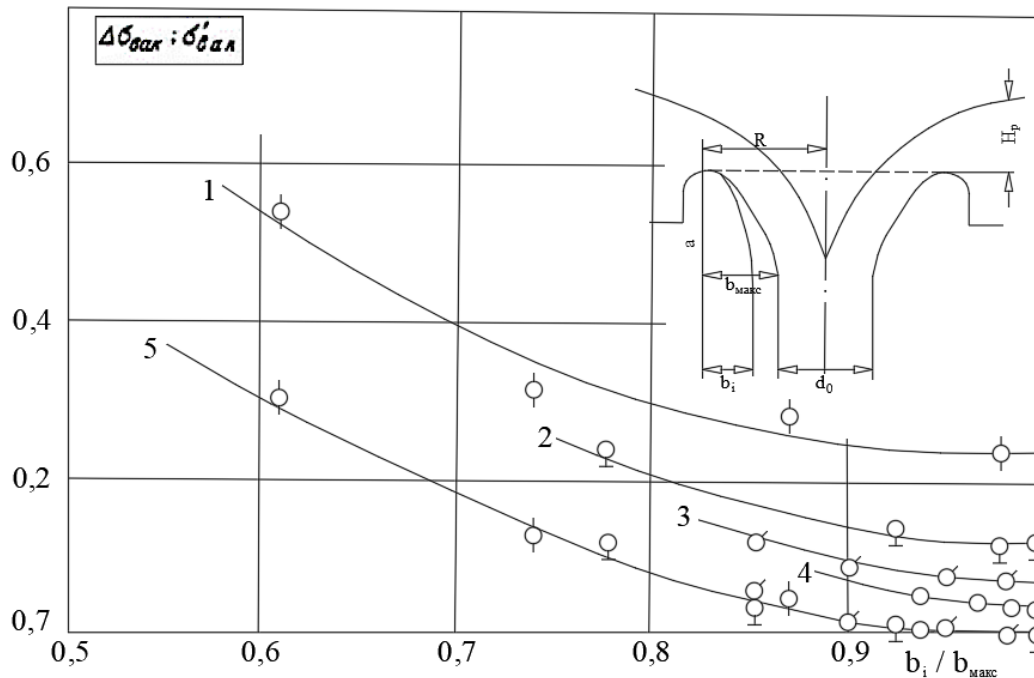


Рисунок 1.12 - Графики изменения вакуумности полных круговых водосливных воронок эллиптического профиля

1, 2, 3, 4 – соответственно для воронок с $H_p/R=0,5; 0,4; 0,3$ и $0,2$; 5 – приращение вакуумности $\sigma_{\text{вак}}$ вакуумных воронок по сравнению с максимальными вакуумами в обычных воронках (без срезов профиля, т.е. при $d_0 = d_i$)

1.6 Используемые в настоящее время методы гашения энергии сбросного потока высоконапорных гидроузлов

В настоящее время наибольшее распространение получили четыре принципиальные системы гашения энергии сбросного потока высоконапорных гидроузлов [13, 16, 66, 68, 69]:

1. Отбросом струи в нижний бьеф с гашением избыточной энергии в воронке размыва. В качестве примеров применения этого способа гашения

энергии можно упомянуть водосбросы Братской, Красноярской, Исть-Илимской ГЭС и др.

2. Донным сопряжением в виде гидравлического прыжка, который происходит в водобойном колодце, который представляет собой конечное сооружение водосброса [11, 12 18]. В качестве примеров применения этого способа гашения энергии можно упомянуть водосбросы Саяно-Шушенской, Зейской, Богучанской ГЭС и др.

3. На многоступенчатом перепаде, который, по существу, представляет собой систему водобойных колодцев [62]. В качестве примера применения этого способа гашения энергии для высоконапорного сооружения можно упомянуть новый водосброс Саяно-Шушенской ГЭС.

4. Гашение избыточной энергии с использованием закрутки потока в водопроводящем сооружении. В качестве примеров применения этого способа гашения энергии можно упомянуть водосброс гидроузла Тери и некоторые варианты водосбросов Рогунской ГЭС.

Однако, учитывая топографические и геологические особенности района строительства ни один из известных способов гашения энергии сбросного потока гидроузла Рогунской ГЭС нельзя признать удовлетворительным по следующим причинам:

1. Все запроектированные на период эксплуатации водосбросные сооружения заканчиваются туннелями, выходящими почти под прямым углом к руслу реки Вахш. При этом скорость потоков в выходных сечениях туннелей находится в диапазоне от 25 до 38 м/с, чему соответствует дальность отброса струи до 200м и более. Учитывая достаточно небольшую ширину русла, струи будут перелетать реку и формировать яму размыва на противоположном берегу, что недопустимо из-за опасности возникновения оползней.

2. Для гашения энергии в водобойном колодце потребовалось бы его устройство с длиной 159...200 м и глубиной до 45 м, что в данных топографических и геологических условиях строительства неприемлемо.

По этим же соображениям неприемлемо строительство многоступенчатого перепада.

Остаётся возможность гашения энергии с помощью закрутки потока, которая для Рогунской ГЭС впервые на модельных установках была предложена и апробирована более 30 лет назад. С тех пор было испытано значительное количество вариантов закручивающих устройств, однако надёжной конструкции до сих пор, практически, не получено. Конструкции с закруткой потока имеют достаточно узкий диапазон расходов, при котором их работа является эффективной. За пределами этого диапазона эффективность гашения энергии резко снижается, и в отводящем водоводе начинают проявляться такие негативные явления, как гидравлические удары, связанные с переходными гидравлическими режимами при изменении величины сбросного расхода и с залповым выходом воздуха [42]. Выбор типа водосброса с закруткой потока зависит от конкретных условий гидроузла и требуемой степени гашения избыточной кинетической энергии потока [46]. При длинном отводящем водоводе $l/4R > 50...60$ (l, R – длина и гидравлический радиус водовода) целесообразно плавно погасить энергию по длине туннеля с круглой, подковообразной или корытообразной формой поперечного сечения [45]. При меньшей относительной длине отводящего водовода $25...30 < l/4R < 50...60$ можно применить камеру гашения. При длине водовода $l/4R < 25...30$ возможно применение схемы контрвихревого гасителя для водосброса [37, 66].

Исследования контрвихревых гасителей (рисунок 1.13) показывают их высокую эффективность с точки зрения гашения избыточной энергии потока. Вследствие активного взаимодействия двух соосных противоположно направленных потоков до 95...98 % энергии потока гасится на коротком участке камеры гашения – 6...8 диаметров. Третий трубопровод присоединен к торцевой стенке камеры гашения и подает незакрученный поток в центральную зону камеры, что позволяет увеличить пропускную способность водосброса и снизить пульсационные нагрузки в камере гашения. Анализ результатов исследований гасителей с взаимодействующими закрученными потоками показывает, что в

перспективе возможно применение подобных конструкций для низко и средненапорных водосбросных сооружений.

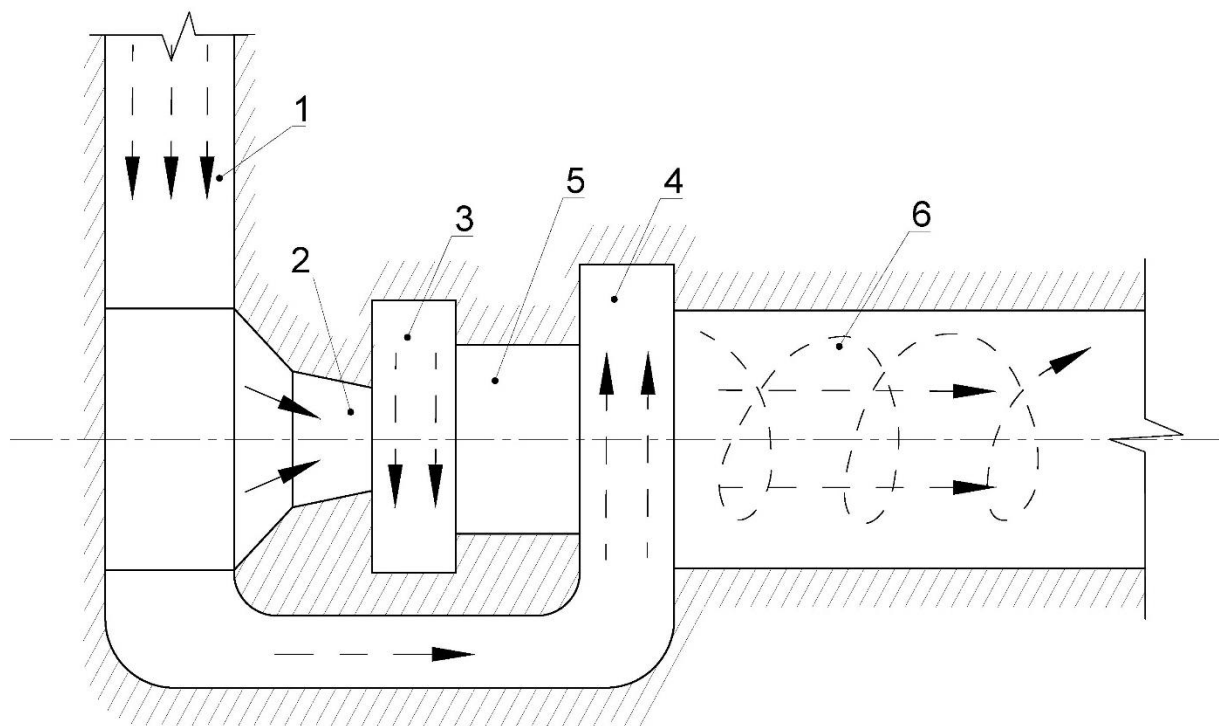


Рисунок 1.13 -Схема контрвихревого водосброса Колымского гидроузла:

- 1—подводящий водовод; 2—входной осевой патрубок;
3, 4—внутренняя и наружная камеры закрутки; 5—промежуточный
патрубок; 6—камера гашения

Закрутка потока в водоводе приводит к появлению дополнительных гидравлических сопротивлений, связанных с вращательным движением жидкости, которые могут в 20 и более раз, в зависимости от величины интенсивности закрутки, превышать сопротивления в водоводе с осевым потоком. Это приводит к снижению коэффициента расхода вихревого водосброса и необходимости увеличения диаметра туннеля для обеспечения заданной пропускной способности. В связи с этим, применение вихревых водосбросов может быть экономически эффективным, когда строительный туннель, часть которого используется как отводящий туннель водосброса, рассчитан на пропуск больших строительных расходов, чем обуславливается его большой диаметр. Примерами

такого решения могут быть водосбросные сооружения Тельмамского гидроузла и гидроузла Тери.

Усиление закрутки потока ведет к интенсификации гашения избыточной энергии потока по длине водовода. Чем большую долю энергии необходимо погасить, тем больше должна быть площадь сечения жгута на начальном участке отводящего водовода и соответственно меньше площадь кольцевого сечения закрученного потока. Несмотря на кажущееся нерациональным частичное использование площади сечения отводящего водовода, в вихревых водосбросах это является неременным условием их работоспособности. По мере гашения энергии по длине водовода диаметр ядра уменьшается, а осевые скорости потока снижаются. Этот фактор имеет большое значение для работы высоконапорных водосбросных систем рассматриваемой конструкции.

Чем больше напор на водосбросе, тем больше значение параметра завихрителя A следует выбирать для того, чтобы на выходе из отводящего водовода обеспечить энергию потока, приемлемую из условий его выхода в нижний бьеф сооружения. Однако необходимо иметь в виду, что увеличение параметра A при сохранении расчетного значения пропускаемого расхода приведет к росту диаметра отводящего водовода, так как уменьшается коэффициент расхода водосброса. Поэтому при выборе режима работы вихревого водосброса, определяемого параметром A , приходится увязывать необходимую степень гашения энергии в отводящем водоводе, размеры водосбросной системы, связанные в основном с диаметром отводящего водовода, и обеспечение благоприятных кавитационных условий в отводящем водоводе, которые определяются в основном соотношением потенциальной и кинетической энергии вблизи стенки.

$$A = \frac{\pi R_{ц} R}{F_{BX}} \sin \beta, \quad (3)$$

где $R_{ц}$ – расстояние от оси туннеля до центра тяжести входного сечения площадью $F_{вх}$; R – радиус туннеля в плоскости оси шахты; β – угол наклона подводящего водовода к завихрителю (рисунок 1.14).

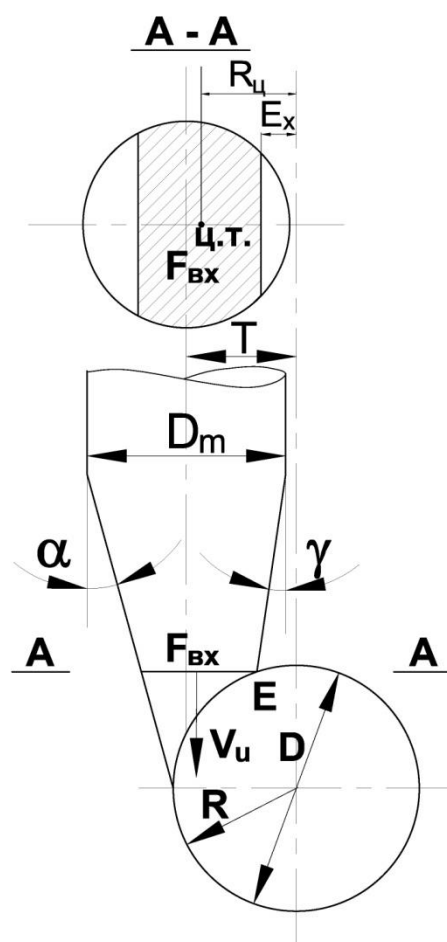


Рисунок 1.14 - Расчетная схема тангенциального завихрителя

Применение тангенциальных срезов (внутренних и внешних) позволяет изменить геометрические соотношения конструкции закручивающего устройства, от которого зависит гидравлическая характеристика потока в отводящем водоводе. Не изменяя планового расположения, подводящего и отводящего водоводов, за счет тангенциальных срезов можно в широких пределах изменить геометрию тангенциального завихрителя, а следовательно, и параметр A .

Важно отметить, что с увеличением параметра завихрителя A и угла наклона шахты β при всех режимах наблюдается тенденция к выравниванию оси жгута, которая сближается с осью водовода. С ростом параметра A вакуум в жгуте $H_{жг}$ уменьшается. Минимальное значение пропускной способности исследованного типа вихревого водосброса, при изменении угла наклона шахты от 60° до 90° , наблюдается при $\beta \approx 75^\circ$. При $\beta > 75^\circ$ решающим фактором для

увеличения расхода водосброса является устойчивость жгута и величина его раскрытия, а при $\beta < 75^\circ$ – поступательная составляющая скорости движения жидкости внутри узла закрутки.

На структуру потока в отводящем водоводе большое влияние оказывает тип и конструкция завихрителя. Большая азимутальная неравномерность поля скоростей проявляется при меньшей интенсивности закрутки потока. Увеличение угла наклона шахты приводит к более равномерному распределению скоростей вдоль водовода.

Таким образом, для условий строительства Рогунской ГЭС необходимо разработать принципиально новое техническое решение, позволяющее исключить, или, по крайней мере, смягчить недостатки существующих устройств, обеспечивающих гашение энергии сбрасываемого потока.

Анализ негативных явлений, имеющих место в каждом из способов гашения энергии, позволяет сформулировать требования, предъявляемые к устройству гашения энергии потока применительно к условиям Рогунской ГЭС, обеспечивающих устранить эти недостатки.

1. Гашение энергии потока за пределами водосбросного сооружения.

Необходимо выполнять гашение энергии до выхода потока в нижний бьеф.

2. Наличие переходных режимов в отводящем туннеле при формировании переменной величины сбросного расхода.

Необходимо применить такую конструкцию отводящего туннеля, которая исключала бы формирование разных форм кривых свободной поверхности потока в отводящем туннеле при изменении расходов. Этому условию наиболее удовлетворяет туннель с обратным уклоном, в котором формируется свободная поверхность в виде кривой спада, которая распространяется от выходного сечения туннеля в сторону верхнего бьефа при переходе от напорного к безнапорному режиму.

3. Наличие залпового выброса воздуха из туннеля.

Формирование этого режима связано с применением туннелей с прямым уклоном. При переходе движения воды в напорный режим возникает "конфликт

интересов" воздуха и воды: воздух в зоне шельги стремится двигаться вверх по уклону, в то время как вода течёт вниз по уклону. Вследствие этого под сводом туннеля возникает воздушный мешок, лобовое сопротивление которого растёт по мере увеличения объёма. При достижении лобового сопротивления подъёмной силы воздушного мешка, он потоком выносится в нижний бьеф, и его выход в атмосферу сопровождается формированием гидравлического удара в туннеле, не говоря уже о шумовых эффектах.

Придание отводящему туннелю отрицательного уклона снимает этот «конфликт интересов» и позволяет обеспечить спокойное течение воды в туннеле при всех гидравлических режимах его работы.

4. Придание отводящему туннелю обратного уклона обеспечивает стабильность работы во всём диапазоне возможных расходов. При отсутствии расхода за счёт предыдущих сбросов воды туннель будет частично заполнен до отметки дна выходного сечения. Этот объём воды будет иметь горизонтальную поверхность с максимальной глубиной, равной величине $h_{\text{макс}} = i \cdot l$ в начале туннеля, где i – уклон дна туннеля, а l – его длина.

При включении в работу туннеля в нём формируется кривая спада, характерной особенностью которой является формирование в створе выходного сечения критической глубины и наличие максимальной глубины в начале туннеля. При этом следует учитывать гидравлическую особенность водоводов круглого поперечного сечения, которая заключается в том, что их максимальная пропускная способность $Q_{\text{макс}}$ обеспечивается при наполнении $h/d < 1$.

Выводы по главе

1. Проведенный обзор показывает, что эволюция гасителей энергии в шахтных водосбросах прошла путь от экстенсивных методов (увеличение объемов бетона в водобойных колодцах) к интенсивным (поиск новых физических принципов взаимодействия потока со средой). Задачу преобразования избыточной кинетической энергии в тепловую (диссипацию) выполняют специальные устройства - гасители энергии. В мировой гидротехнической практике накоплен обширный опыт проектирования таких устройств, однако ни одно из традиционных решений не является универсальным. Целью обзорной главы является систематизация существующих подходов к гашению энергии в шахтных водосбросах, анализ их положительных и отрицательных сторон, а также теоретическое обоснование того, что вакуумный шахтный гаситель энергии представляет собой качественно новый этап развития технологии гашения энергии, обладающий решающими преимуществами перед известными конструкциями.

2. Принципиальная идея работы вакуумного шахтного гасителя энергии заключается в полной изоляции внутреннего пространства ствола шахты от доступа в неё атмосферного воздуха. Традиционные решения - глубокие гасительные камеры, многоступенчатые перепады - достигли предела своей эффективности. Их эксплуатация сопряжена с проблемами кавитационного разрушения, неприемлемыми вибрационными нагрузками и колоссальными затратами на этапе возведения. Вакуумный шахтный гаситель энергии, основанный на принципе изоляции ствола шахты от атмосферного воздуха и обеспечении напорного режима течения посредством горизонтальных затворов, устраняет указанные проблемы.

3. Несмотря на повышенные требования к герметичности швов и точности настройки затворных механизмов, совокупность эксплуатационных выгод делает вакуумный принцип доминирующим для современных и перспективных гидротехнических объектов высокого напора. Именно отказ от борьбы с

вакуумом и использование его физического потенциала для стабилизации потока определяют безусловное преимущество данной технологии в сравнении со всеми существующими аналогами гасителей энергии.

С учетом изложенного, целью настоящей работы является теоретическое и экспериментальное обоснование вакуумного шахтного гасителя энергии, что соответствует пункту 1. Теория и методы обоснования, проектирования, строительства, эксплуатации, ремонта и реконструкции плотин из грунтовых материалов, бетонных и железобетонных водоподпорных гидротехнических сооружений, водопроводящих и водопропускных гидротехнических сооружений, гидротехнических сооружений мелиоративных систем, сооружений речных и морских портов, сооружений на континентальном шельфе, возводимых в различных природно-климатических условиях, в том числе в Арктике и в зонах сейсмической опасности, пункту 5. Конструкции и гидравлические режимы работы водопропускных сооружений, их головных, транзитных и концевых частей. Воздействие высокоскоростных потоков на сооружения. Принципы гашения энергии и конструкции для гашения энергии потока. Динамические нагрузки на элементы проточных частей. Прогноз кавитационной обстановки. Кавитация и кавитационная эрозия конструктивных частей гидравлических машин, поверхностей и элементов сооружений. Конструкции и технологии противокавитационной защиты. Аэрация на различных участках водосбросного тракта и ее прогноз и пункту 15. Турбулентность потоков в естественных и искусственных руслах, напорных системах и сооружениях. Общие и местные деформации русел и бьефов гидроузлов. паспорта научной специальности 2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология.

ГЛАВА 2. Теоретическое обоснование работы вакуумного гасителя энергии применительно к шахтным водосбросам

Рассмотрим обоснование выбора и гидравлическую концепцию устройства гашения энергии для условий Рогунской ГЭС. Анализ недостатков, присущих существующим способам диссипации энергии потока, позволил сформулировать комплекс требований к проектируемому устройству применительно к специфике эксплуатации водосбросных сооружений Рогунской ГЭС.

1. Локализация зоны диссипации. Процесс преобразования избыточной кинетической энергии должен быть полностью завершен в пределах самого водосбросного тракта до выхода транзитного потока в нижний бьеф с целью исключения размывов русла.

2. Гидравлическая стабилизация отводящего туннеля при переменных расходах. Конструкция должна исключать формирование переходных режимов и нестационарных форм кривых свободной поверхности (как подпора, так и спада) при варьировании величины сбросного расхода. Данному критерию наиболее полно удовлетворяет профиль трассы с отрицательным уклоном дна. При смене напорного режима на безнапорный это обеспечивает распространение волны депрессии от выходного створа навстречу течению вплоть до критического сечения.

3. Исключение залповых воздушных выбросов и пульсационных нагрузок. Формирование воздушных пробок является имманентным недостатком туннелей с положительным уклоном. В условиях смены гидравлического режима возникает встречное движение фаз: воздух аккумулируется под шельгой свода, формируя газовую полость, объем которой возрастает по мере наполнения водовода. Достижение равенства между лобовым сопротивлением воздушного мешка и подъемной силой потока приводит к его экстремному выносу в нижний бьеф, что инициирует развитие гидроудара и генерирует интенсивные акустические вибрации. Применение обратного уклона нивелирует указанный «конфликт интересов» фаз, обеспечивая транспортировку выделившегося воздуха

транзитным потоком и гарантируя квазистационарность течения во всем диапазоне эксплуатационных расходов.

4. Обеспечение пропускной способности и автостабилизации системы. Отрицательный уклон гарантирует стабильную работу сооружения в широком диапазоне расходов, включая минимальные значения. При отсутствии сбросов начальное состояние туннеля характеризуется частичным затоплением со статическим горизонтом воды у выходного оголовка. Пусковой режим сопровождается установлением кривой спада с локализацией критической глубины в выходном сечении. При этом необходимо учитывать фундаментальную гидравлическую особенность напорных водоводов круглого поперечного сечения: достижение максимального удельного расхода ($Q_{\max}$) реализуется при степени наполнения $h/d < 1$.

2.1. Теоретическое обоснование параметров конструкции шахтного гасителя энергии потока

Расчёт расходной характеристики водовода круглого поперечного сечения при равномерном режиме течения потока.

Одной из особенностей водовода круглого поперечного сечения является наличие точки перегиба на кривых изменения расхода в зависимости от глубины наполнения h при работе в безнапорном режиме. Определим расходную характеристику поперечного сечения, используя схему рисунке 2.1 [6, 7, 54]. Обозначим через r - радиус поперечного сечения, а через β – половину центрального угла, образованного радиусами, проходящими через точки уреза потока с глубиной h .

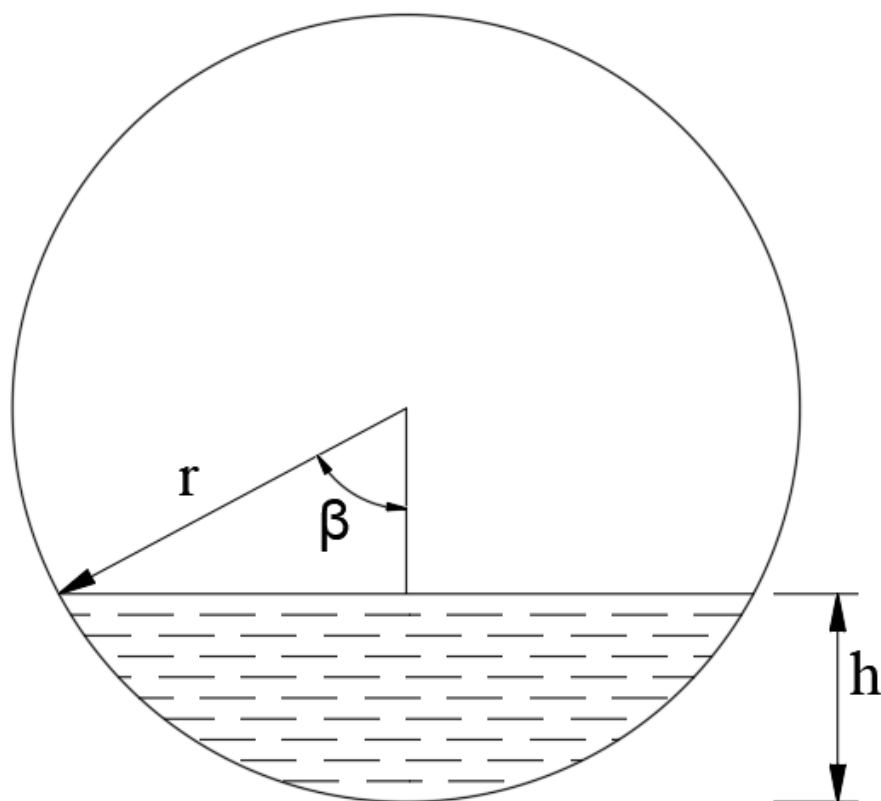


Рисунок 2.1 - Схема к расчёту параметров потока в круглом водоводе

Расчётные выражения для определения геометрических характеристик живого сечения потока: глубины потока h , площади f , смоченного периметра χ и гидравлического радиуса R будут иметь следующий вид:

- глубина потока h

$$h = r \cdot (1 - \cos(\beta)) , \quad (2.1)$$

- площадь живого сечения f

$$f = \frac{r^2}{2} \cdot (2 \cdot \beta - \sin(2 \cdot \beta)) , \quad (2.2)$$

- смоченный периметр χ

$$\chi = 2 \cdot r \cdot \beta , \quad (2.3)$$

- гидравлический радиус R

$$R = \frac{r}{2} \cdot \left(1 - \frac{\sin(2 \cdot \beta)}{2 \cdot \beta} \right) . \quad (2.4)$$

Расход потока с глубиной h и уклоном водовода i определяется уравнением Шези:

$$Q = C \cdot f \cdot \sqrt{R \cdot i} . \quad (2.5)$$

В (2.5) коэффициент Шези "C" может быть определён по формуле Маннинга

$$C = \frac{R^{1/6}}{n}$$

с учётом чего (2.5) примет вид:

$$Q = \frac{R^{2/3} \cdot f}{n} \cdot \sqrt{i} . \quad (2.5')$$

Выражение (2.5') висит только от геометрических характеристик сечения и качества его изготовления и называется расходной характеристикой "K". Для водовода, работающего полным сечением,

$$K = K_o = \frac{d^{2/3} \cdot \pi \cdot d^2}{4^{2/3} \cdot 4 \cdot n} = 0.3117 \cdot \frac{d^{5/3}}{n} ,$$

где n – коэффициент шероховатости. Расход частично заполненного сечения относительно расхода полного сечения определяется соотношением модулей расхода этих сечений K/K_o .

На рис. 2.2 приведена зависимость расхода через круглое поперечное сечение водовода в долях от максимального в зависимости от относительного заполнения h/d .

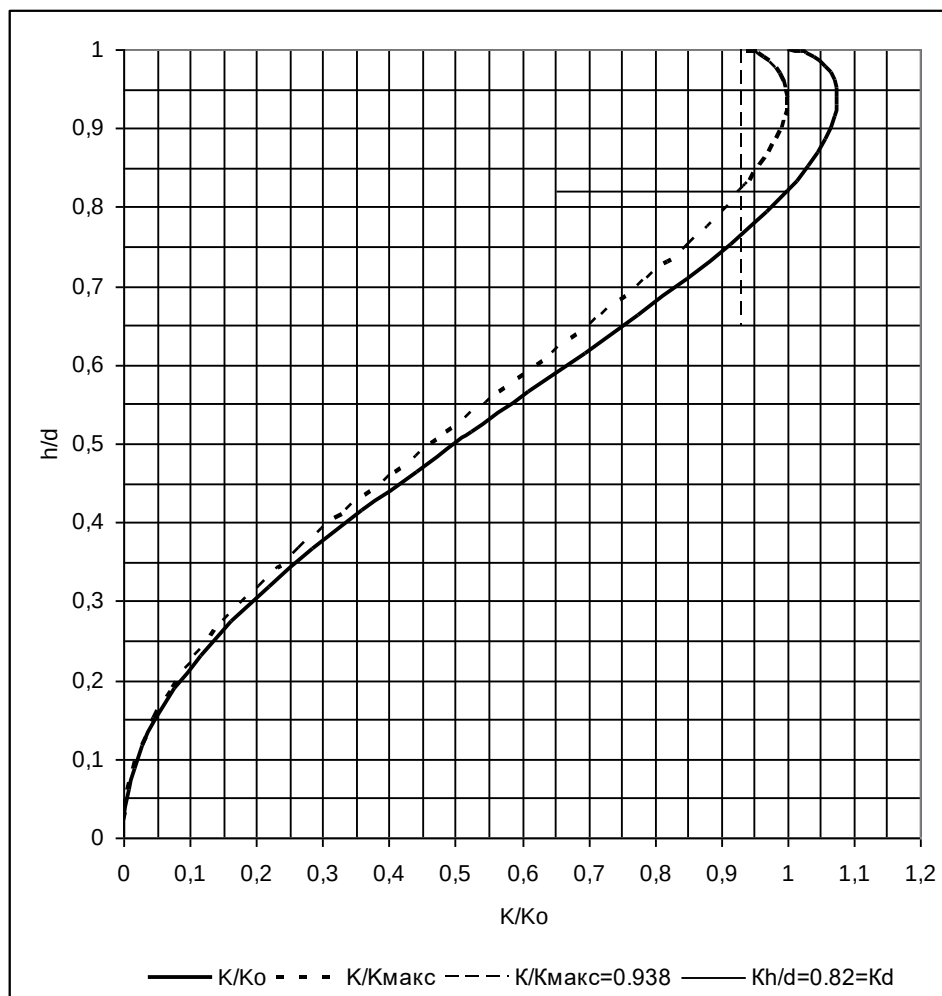


Рисунок 2.2 - Зависимость относительной пропускной способности водовода круглого сечения от его наполнения h/d

Как видно из графика этого рисунка, максимальный расход будет идти при наполнении $h/d=0.938$. При работе всем сечением водовод пропускает только $0.93Q_{\text{max}}$ максимального расхода. В тоже время, этот же расход, соответствующий заполненному туннелю, будет проходить при наполнении $h/d=0.82$.

Следовательно, формирование свободной поверхности в туннеле круглого поперечного сечения будет зависеть от того, происходить нарастание или уменьшение расходов в туннеле. При нарастании расходов изменение максимальной глубины воды в туннеле будет происходить по нижнему участку кривой графиков рис. 2.2. При достижении наполнения $h/d=0.938$ глубина скачком увеличится до полного наполнения, а пропускная способность упадёт при этом соответственно на 7%. Для поддержания прежней пропускной

способности потребуется соответствующая корректировка в открытии затворов, иначе начнётся подъём уровня водохранилища.

При уменьшении расходов туннеля, при снижении расхода менее величины $0.93Q_{\text{макс}}$ произойдёт, отрыв потока от шелыги с уменьшением глубины до величины $h/d=0.82$, что необходимо учитывать при гидравлических расчётах и эксплуатации туннеля.

Расчёт характеристики водовода круглого поперечного сечения при критическом режиме течения потока:

Уравнение (2.5) определяет расход туннеля при равномерном режиме течения, когда в туннеле устанавливается постоянная глубина потока по всей его длине, включая выходное сечение. Рассматриваемый отводящий участок туннеля №3 имеет достаточно ограниченную длину в пределах 43...48 диаметров с неподтопленным выходом. Гидравлический режим, который будет устанавливаться в нём, зависит от уклона дна туннеля и расхода. При отрицательном уклоне туннеля в нём будет формироваться кривая спада с критической глубиной в выходном сечении. При проектировании туннеля с прямым уклоном возможно формирование трёх режимов: кривой спада при уклоне $i < i_0$, кривой подпора при уклоне $i > i_0$ или равномерного режима при уклоне $i = i_0$, причём величина уклона равномерного режима i_0 определяется из уравнения (2.5). Форма кривой свободной поверхности потока зависит от отношения между принятым уклоном дна туннеля i и критическим уклоном $i_{\text{кр}}$. Следовательно, для анализа возможных режимов движения воды в отводящем туннеле, прежде всего, необходимо определить величины критических глубин $h_{\text{кр}}$ и критических уклонов $i_{\text{кр}}$.

Критическая глубина $h_{\text{кр}}$ соответствует минимальной величине энергии сечения потока при данном расходе, и определяется из уравнения [2, 11, 12]:

$$E = h + \frac{\alpha \cdot V^2}{2g} = \min , \quad (2.6)$$

С учётом (2.1) и (2.2) вместо (2.6) получим:

$$E = r \cdot (1 - \cos \beta_{кр}) + \frac{4 \cdot \alpha \cdot Q^2}{2g \cdot r^4 \cdot [2\beta_{кр} - \sin(2\beta_{кр})]^2} = \min . \quad (2.6')$$

Величина критического угла $\beta_{кр}$, соответствующего критической глубине потока $h_{кр}$, определится из условия $dE/\beta_{кр} = 0$:

$$\frac{dE}{d\beta_{кр}} = r \cdot \sin \beta_{кр} - 2 \cdot \frac{4 \cdot \alpha \cdot Q^2 \cdot [2 - 2 \cdot \cos(2\beta_{кр})]}{2g \cdot r^4 \cdot [2\beta_{кр} - \sin(2\beta_{кр})]^3} = 0, \quad (2.7)$$

откуда получаем выражение зависимости величины критического расхода и критического угла $\beta_{кр}$:

$$\frac{g \cdot r^5}{8 \cdot \alpha \cdot Q^2} = \frac{[1 - \cos(2\beta_{кр})]}{\sin \beta_{кр} \cdot [2\beta_{кр} - \sin(2\beta_{кр})]^3}, \quad (2.8)$$

которое позволяет определить величину критического расхода $Q_{кр}$ при наполнении сечения с углом β :

$$Q_{кр} = \sqrt{\frac{g \cdot r^5 \cdot \sin \beta \cdot [2\beta - \sin(2\beta)]^3}{8 \cdot \alpha \cdot [1 - \cos(2\beta)]}}. \quad (2.9)$$

В период проведения модельных гидравлических исследований, были проведены проектные проработки исследуемой конструкции туннеля №3. По этим проработкам было принято решение увеличить максимальный расход водосброса до величины $Q_{макс.}=3500$ куб. м/с. В ниже приведенном анализе режимов работы туннеля учтены эти проработки и расчёты выполнены не только для начального варианта отводящего туннеля диаметром $d=14.0$ м, но и для туннелей диаметром $d=16.0$ м и $d=18.0$ м, что позволяет более полно выполнить анализ возможных режимов работы туннеля.

На рисунке 2.3 приведены графики изменения критических расходов в туннеле круглого поперечного сечения диаметром $d=14.0$ м, $d=16.0$ м и $d=18.0$ м в зависимости от относительной глубины наполнения h/d . На этом рисунке нанесены линия максимального критического расхода $h_{кр.макс.}/d=0.938$, соответствующая максимальному расходу при его работе в безнапорном режиме, и линия $h_{кр.}/d=0.93$, соответствующая "провалу" свободной поверхности потока

до относительной глубины $h_{кр.}/d=0.82$ при уменьшении расхода менее величины $0.93Q_{макс.}$

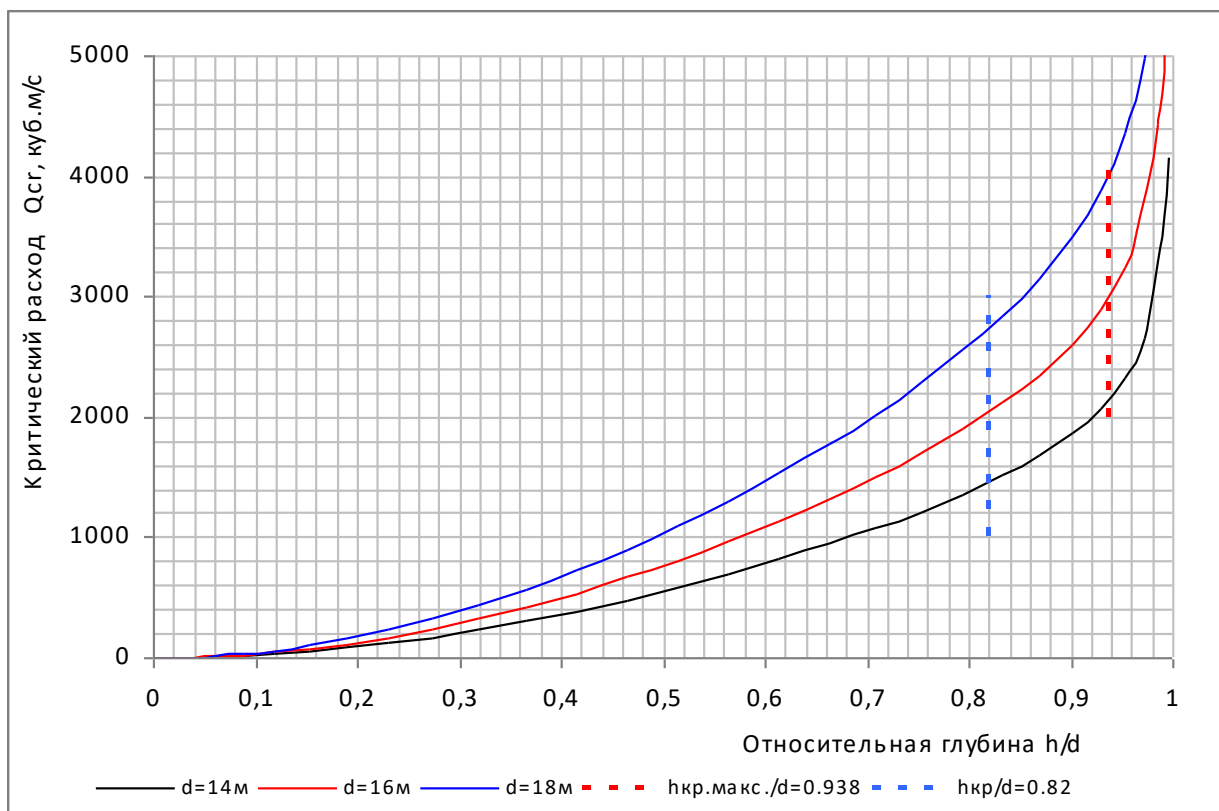


Рисунок 2.3 - Зависимость критического расхода от относительной глубины воды в туннеле

На рисунке 2.4 приведены графики изменения критических глубин расходов в туннеле круглого поперечного сечения диаметром $d=14.0$ м, $d=16.0$ м и $d=18.0$ м в зависимости от расхода.

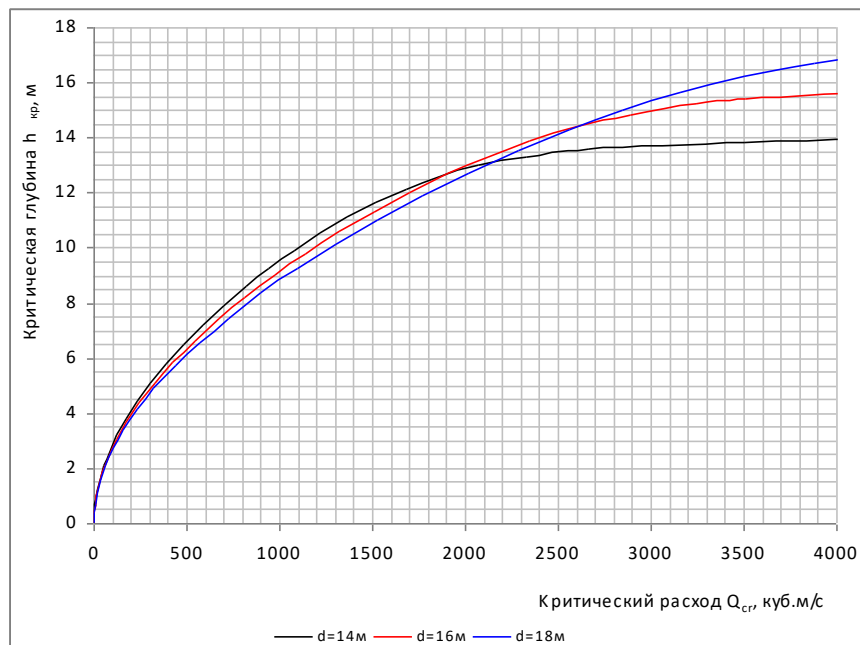


Рисунок 2.4 - Зависимость критического расхода от критической глубины воды в туннеле

На рисунке 2.5 приведены графики изменения скорости воды в туннеле круглого поперечного сечения диаметром $d=14.0\text{м}$, $d=16.0\text{м}$ и $d=18.0\text{м}$ в зависимости от величины критического расхода.

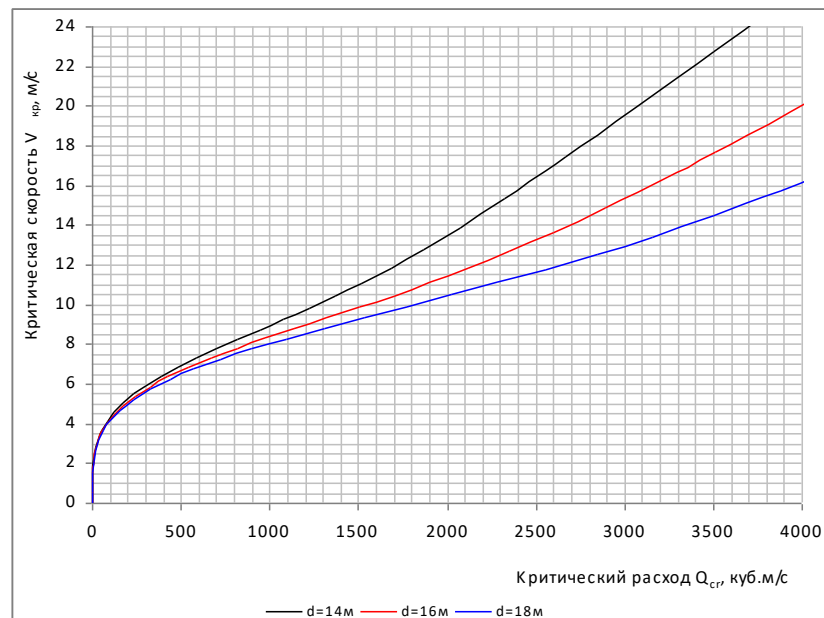


Рисунок 2.5 - Зависимость скорости от критического расхода воды в туннеле

Для анализа режимов движения воды в отводящем туннеле при безнапорном режиме необходимо иметь зависимость между расходом и критическим уклоном. Величина критического уклона $i_{кр}$ определится из уравнения (2.5) при подстановке в него критических значений расхода и площади живого сечения и его гидравлического радиуса, соответствующих этому расходу. Для использования уравнения (2.5) необходимо знать коэффициент Шези "С". В практике гидравлических расчётов применяются два метода определения коэффициента Шези [3, 4]:

- непосредственно по формулы Шези:

$$C = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{\lambda}}, \quad (2.10)$$

- по одной из эмпирических формул. Наибольшую популярность имеет формула Маннинга:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n}. \quad (2.11)$$

Для определения коэффициента λ гидравлического трения наиболее употребительна формула Шиффренсона, связывающая величину Δ абсолютной шероховатости русла и коэффициента λ :

$$\lambda = 0.11 \cdot \sqrt{\frac{\Delta}{4 \cdot R}}, \quad (2.12)$$

Недостатком этих формул является неопределённость в назначении входящих в них определяющих коэффициентов: коэффициента шероховатости "n" в (2.11) и величину Δ абсолютной шероховатости русла в (2.12). Для их определения имеются соответствующие таблицы, которые дают осреднённые значения этих коэффициентов в зависимости от структуры материала стенок русла. Поскольку назначение этих параметров достаточно субъективно, то и результаты расчётов могут иметь значительные расхождения. Учитывая это обстоятельство, при определении критических уклонов были использованы два значения величины Δ абсолютной шероховатости русла $\Delta=2\text{мм}$ и $\Delta=3\text{мм}$.

Величины критических уклонов в зависимости от величины критической глубины для отводящего туннеля диаметром $d=16.0\text{м}$ приведены на рис. 2.6 и 2.7. Затем были подобраны значения коэффициентов шероховатости $n=0.0154$ и $n=0.0161$, которые дали совпадающие значения критических уклонов. Эти кривые соответственно приведены на рис. 2.6 и 2.7. Поскольку априори невозможно оценить качество работ, в дальнейших расчётах использовано значение величины $\Delta=3\text{мм}$ и соответствующее значение $n=0.0161$.

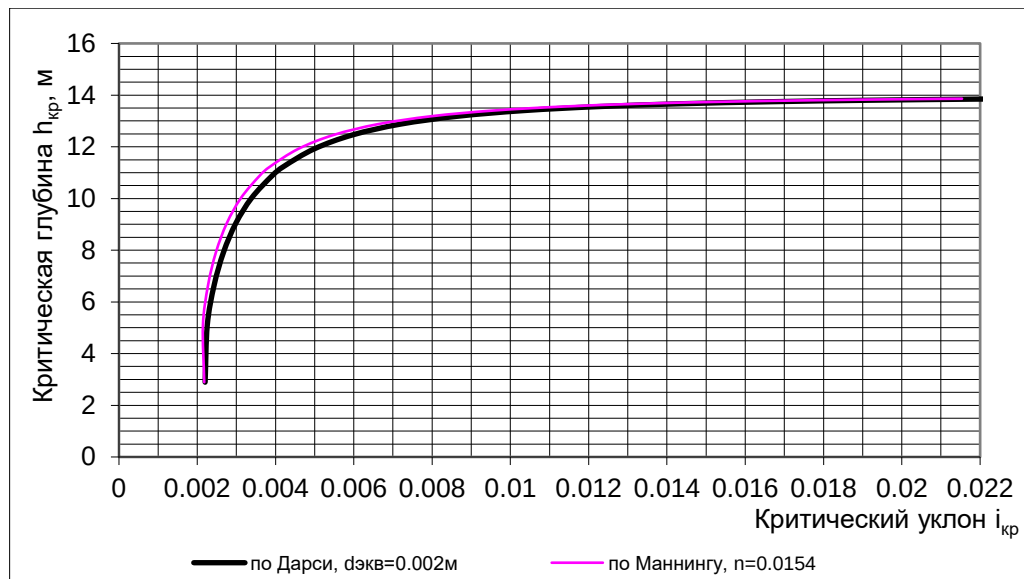


Рисунок 2.6 - Зависимость критического уклона от критической глубины воды в туннеле диаметром $d=16$ при $\Delta=2\text{мм}$

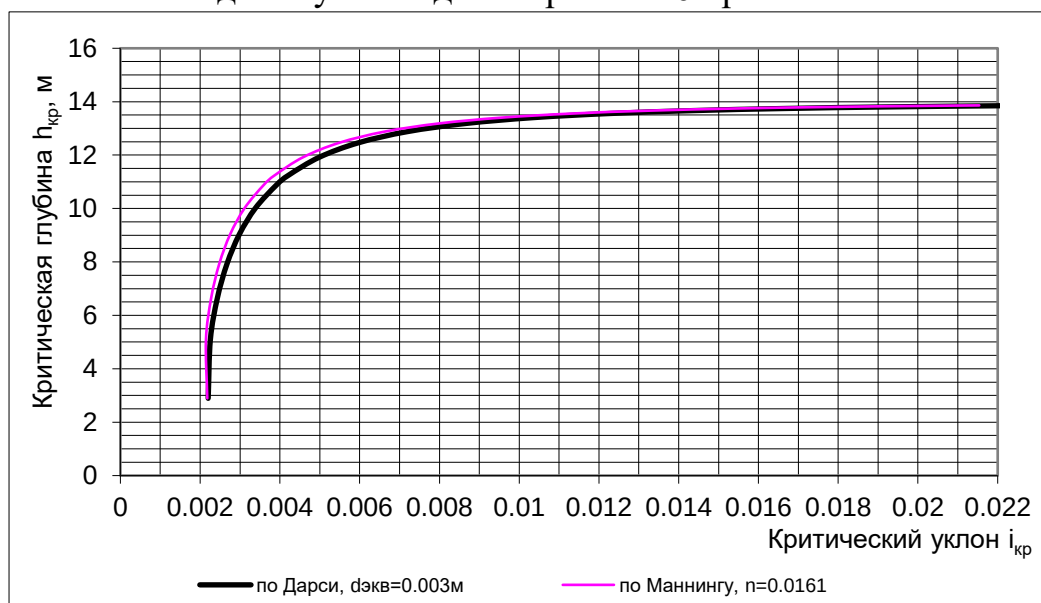


Рисунок 2.7 - Зависимость критического уклона от критической глубины воды в туннеле диаметром $d=16\text{м}$ при $\Delta=3\text{мм}$

На рисунке 2.8 приведены результаты расчётов зависимости критического уклона от глубины потока $i_{кр}=f(h, d)$ для туннелей диаметром 14.0, 16.0 и 18.0м, а на рис. 2.9. аналогичные кривые зависимости критического уклона $i_{кр}=f(Q, d)$.

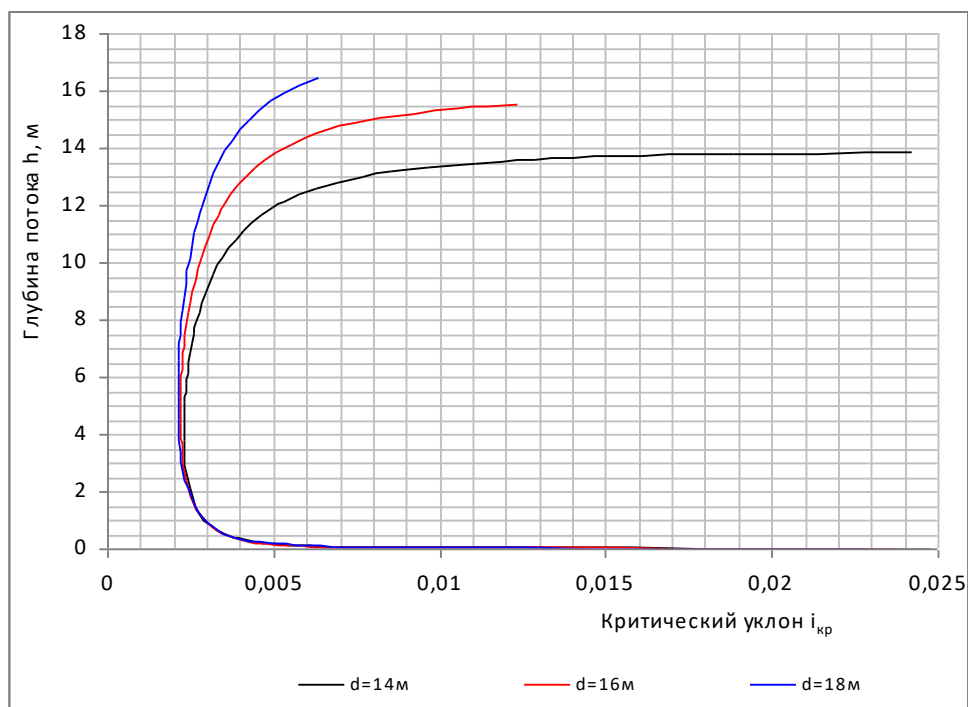


Рисунок 2.8 - Зависимость критического уклона от критической глубины воды и диаметра туннеля

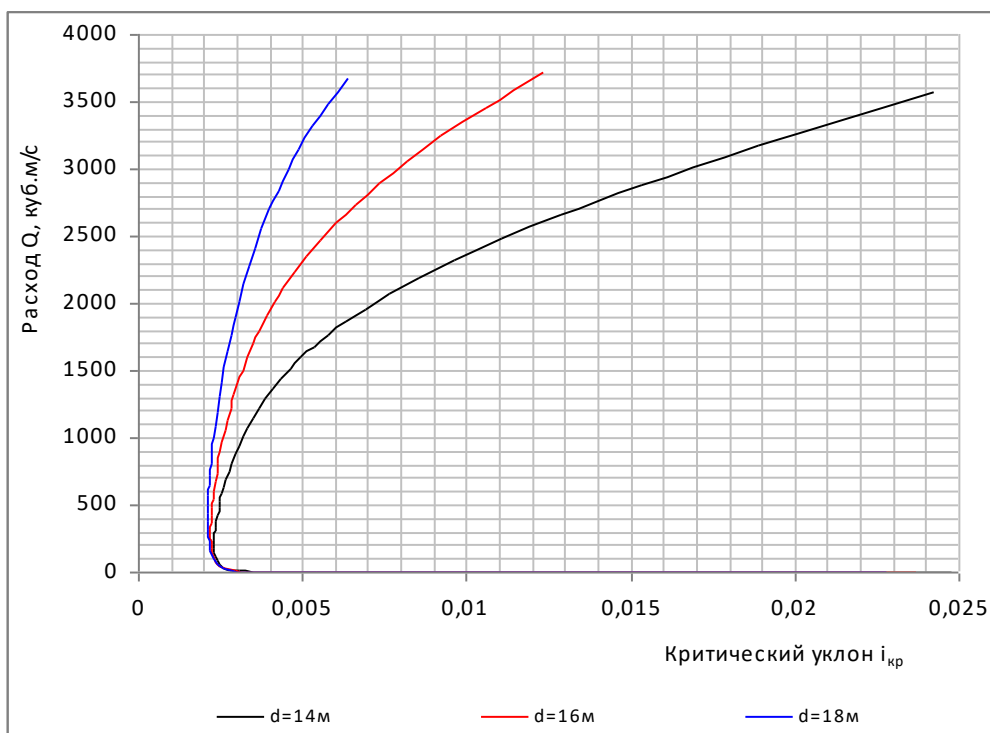


Рисунок 2.9 - Зависимость критического уклона от расхода и диаметра туннеля

Как видно по графикам этих кривых, минимальный критический уклон для отводящего туннеля составляет $i_{кр.мин.}=0.0022$.

Из этого следует, что при уклонах дна отводящего туннеля менее $i<0.002$ при всех расходах установится кривая спада с минимальной глубиной, равной критической, в выходном сечении туннеля [4, 6].

Однако, при выполнении в туннеле прямого уклона, при переходе режима движения воды в напорный режим, выделяющийся из воды воздух и собирающийся под шельгой туннеля будет стремиться двигаться к входному сечению. Это стремление будет тем большим, чем большим будет уклон туннеля. В этом случае вступают в противоречие желание уменьшить диаметр туннеля и, соответственно, затраты на его сооружение за счёт увеличения уклона, и необходимость выполнения технологических затрат на предупреждение залпового выхода воздуха. Одновременно при решении вопроса о назначении диаметра туннеля необходимо учитывать дополнительно ещё два обстоятельства:

1. Увеличение скорости потока на выходе из туннеля затрудняет условия его растекания в нижнем бьефе, обеспечивающем безопасность с точки зрения устойчивости русла.

2. Увеличение уклона и увеличение скоростей потока влечёт за собой необходимость повышения качества бетонной отделки с целью недопущения кавитационного и механического разрушения отделки.

В таблице 2.1 приведены значения допускаемых скоростей по условиям кавитации на гладкой поверхности бетона [76].

Таблица 2.1.

Допустимые скорости потока по условиям кавитационной стойкости бетона

Воздухосодержание, %	Пороговые скорости, м/с			
	Марка бетона			
	150	300	400	500
0.0	7.5	13.0	17.5	22.0
4.0	14.0	20.0	24.0	28.5
8.0	22.0	27.5	32.0	--

Из условий предупреждения механического разрушения бетона потоком допустимые скорости в туннеле можно назначать по данным таблицы 2.2 [67].

Таблица 2.2

Допустимые скорости потока по условиям механического разрушения бетона потоком

Марка бетона	Допустимая скорость [V] м/с при глубине потока h, м			
	2	3	5	10
150	17.1	18.0	19.1	20.6
200	19.0	20.0	21.2	22.9
300	23.3	24.6	26.1	28.1
400	-	-	-	32

В таблицах 2.1 и 2.2 приведены данные для марок бетона. В современном гидротехническом строительстве в соответствии с нормативными документами бетон маркируется классами.

Класс бетона - это числовая характеристика какого-либо его свойства, принимаемая с гарантированной обеспеченностью 0,95. Это значит, что установленное классом свойство обеспечивается не менее чем в 95 случаях из 100 и лишь в 5-ти случаях можно ожидать его не выполненным.

В соответствии с ГОСТ 26633-91 бетоны тяжелые и мелкозернистые подразделяются на классы: В1; В1,5; В2; В2,5; В3,5; В5; В7,5; В10; В12,5; В15; В20; В25; В30; В40; В45; В50; В55; В60. Соотношение между марками и классами бетона приведено в таблице 2.3.

Таблица 2.3 Соотношение между классами и марками бетона по прочности при нормативном коэффициенте вариации $v = 13,5\%$

Класс бетона по прочности	Средняя прочность бетона ($\bar{R}$)*, кгс/см ²	Ближайшая марка бетона по прочности М	Отклонение ближайшей марки бетона от средней прочности класса, %, $\frac{M - \bar{R}}{\bar{R}} \cdot 100$
Сжатие			
В3,5	45,8	М50	+9,2
В5	65,5	М75	+14,5
В7,5	98,2	М100	+1,8
В10	131,0	М150	+14,5
В12,5	163,7	М150	-8,4
В15	196,5	М200	+1,8
В20	261,9	М250	-4,5
В22,5	294,7	М300	+1,8
В25	327,4	М350	+6,9
В27,5	360,2	М350	-2,8
В30	392,9	М400	+1,8
В35	458,4	М450	-1,8
В40	523,9	М550	+5,0
В45	589,4	М600	+1,8
В50	654,8	М700	+6,9
В55	720,3	М700	-2,8

Анализируя данные таблиц 2.1 и 2.2. видно, что по условиям кавитационной прочности скорость воды в отводящем туннеле нельзя допускать более 17.5 м/с для бетона марки М400, в то время как по условиям механической прочности можно допускать скорость более 30м/с. По таблице 2.3 видно, что бетону марки М400 соответствует класс бетона В30.

Из графиков рис. 2.5 видно, что скорость $[V]=17\text{м/с}$ при прохождении расхода $Q_{\text{макс}}=3500\text{куб.м/с}$ может быть обеспечена по туннелю диаметром $d=16.0\text{м}$, которая и может быть рекомендована к проектированию. Для обеспечения кавитационной стойкости бетон обделки должен выполняться из бетона класса В30.

Расчёт расходной характеристики водовода круглого поперечного сечения при неравномерном режиме течения безнапорного потока

Анализ работы туннеля при неравномерном режиме безнапорного потока упрощается при использовании кривых свободной поверхности. Эти же кривые одновременно позволяют определить границы, при которых безнапорный режим движения воды переходит в напорный режим движения [25].

Для расчётов, связанных с построением кривых свободной поверхности воды в отводящем туннеле, был использован метод Чарномского, связывающий полную энергию двух сечений, расположенных на расстоянии Δs :

$$h_1 + \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2g} + i \cdot \Delta s = h_2 + \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2g} + \lambda_{cp} \cdot \frac{V_{cp}^2}{4 \cdot g \cdot R_{cp}} \cdot \Delta s, \quad (2.13)$$

Откуда получаем выражение для определения длины участка Δs с глубинами и скоростями соответственно h_1 , V_1 и h_2 , V_2 :

$$\left(\lambda_{cp} \cdot \frac{V_{cp}^2}{8 \cdot g \cdot R_{cp}} - i \right) \cdot \Delta s = (h_1 - h_2) + \frac{\alpha}{2g} \cdot (V_1^2 - V_2^2). \quad (2.14)$$

Уравнение (2.14) решается подбором. Для русел прямоугольного поперечного сечения разработаны соответствующие таблицы, которые позволяют определить расстояние между двумя сечениями с заданными глубинами h_1 и h_2 .

Для сечений круглого сечения таких таблиц не имеется. Расчёты осложняются ещё тем, что глубины являются ещё и функцией центрального угла β .

Для упрощения расчётов выполним следующие преобразования уравнения (2.14) с использованием зависимостей (2.1)...(2.4). Выразим скорость как Q/f , после чего получим:

$$\left(\lambda_{cp} \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{8 \cdot g \cdot r^5 \cdot [2 \cdot \beta_{cp} - \sin(2 \cdot \beta_{cp})]^2 \cdot \left[1 - \frac{\sin(2\beta_{cp})}{2 \cdot \chi_{cp}} \right]} - i \right) \cdot \Delta s =$$

$$= r \cdot (\cos \beta_2 - \cos \beta_1) + \frac{4 \cdot \alpha \cdot Q^2}{2g} \cdot \left\{ \frac{1}{[2 \cdot \beta_1 - \sin(2 \cdot \beta_1)]} - \frac{1}{[2 \cdot \beta_2 - \sin(2 \cdot \beta_2)]} \right\} \quad (2.15)$$

По (2.15) будем определять такие расстояния Δs , для которых будет выдерживаться соотношение $\beta_2 = k \beta_1$. Для этого условия выражение (2.15) примет вид:

$$\left(\lambda_{cp} \cdot \frac{2}{g \cdot r^5 \cdot [(1+k) \cdot \beta - \sin((1+k) \cdot \beta)]^2 \cdot \left[1 - \frac{\sin((1+k)\beta)}{(1+k) \cdot \beta} \right]} - i \right) \cdot \Delta s =$$

$$= r \cdot (\cos(k \cdot \beta) - \cos \beta) + \frac{4 \cdot \alpha \cdot Q^2}{2g} \cdot \left\{ \frac{1}{[2 \cdot \beta - \sin(2 \cdot \beta)]} - \frac{1}{[2 \cdot k \cdot \beta - \sin(2 \cdot k \cdot \beta)]} \right\} \quad (2.16)$$

Уравнение (2.16) позволяет определить длину участка Δs , на котором центральный угол β изменяется на величину $\Delta\beta = (k-1) \cdot \beta$, без подбора прямым решением уравнения:

$$\Delta s = \frac{r \cdot (\cos(k \cdot \beta) - \cos \beta) + \frac{4 \cdot \alpha \cdot Q^2}{2g} \cdot \left\{ \frac{1}{[2 \cdot \beta - \sin(2 \cdot \beta)]} - \frac{1}{[2 \cdot k \cdot \beta - \sin(2 \cdot k \cdot \beta)]} \right\}}{\lambda_{cp} \cdot \frac{Q^2}{g \cdot r^5 \cdot [(1+k) \cdot \beta - \sin((1+k) \cdot \beta)]^2 \cdot \left[1 - \frac{\sin((1+k)\beta)}{(1+k) \cdot \beta} \right]} - i} \quad (2.16)$$

Последовательно, принимая значение центрального угла β_2 предыдущего участка за β_1 последующего участка с последующим суммированием длин этих участков, определяется изменение центрального угла по длине туннеля и по (2.1) изменение глубины.

По этой методике рассчитаны кривые свободной поверхности в отводящем туннеле диаметром $d=16.0\text{ м}$ с уклонами $i = -0.003$, $i = -0.001$, $i = +0.0005$ и $i = +0.001$ для расходов в диапазоне от $Q=172\text{ м}^3/\text{с}$ до $Q=3500\text{ м}^3/\text{с}$. Эти кривые приведены соответственно на рис. 2.10...рис. 2.13.

Как и следовало ожидать, наиболее благоприятные режимы, соответствующие минимальным скоростям воды по длине отводящего туннеля, получаются при обратном уклоне $i = -0.003$, при котором полным сечением отводящий туннель начинает работать уже при расходе $Q=1000\text{ м}^3/\text{с}$. При положительном уклоне $i = +0.001$, полным сечением отводящий туннель начинает работать только при расходе больше $Q=1600\text{ м}^3/\text{с}$ [67].

Таким образом, желательно уклон отводящего туннеля назначить со значением, минимально возможным по условиям производства работ.

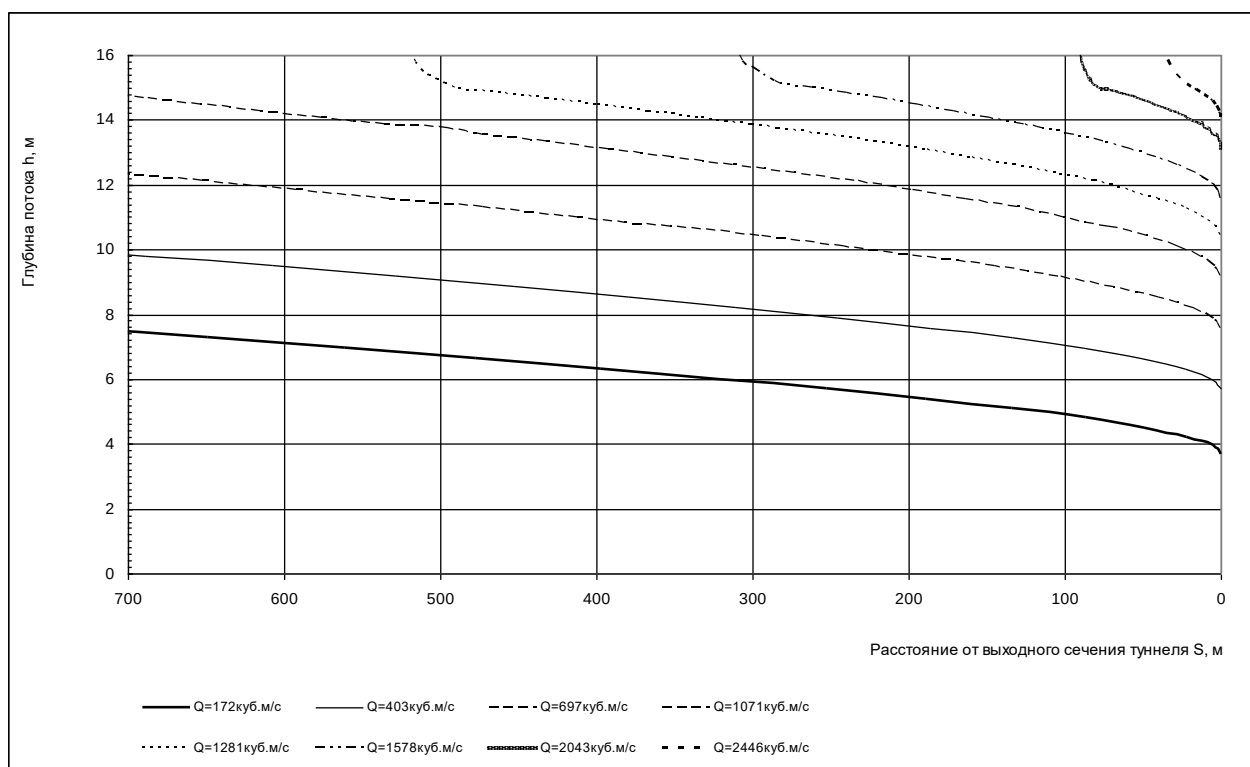


Рисунок 2.10 - Кривые спада в отводящем туннеле диаметром $d=16.0\text{ м}$ с уклоном $i=-0.003$

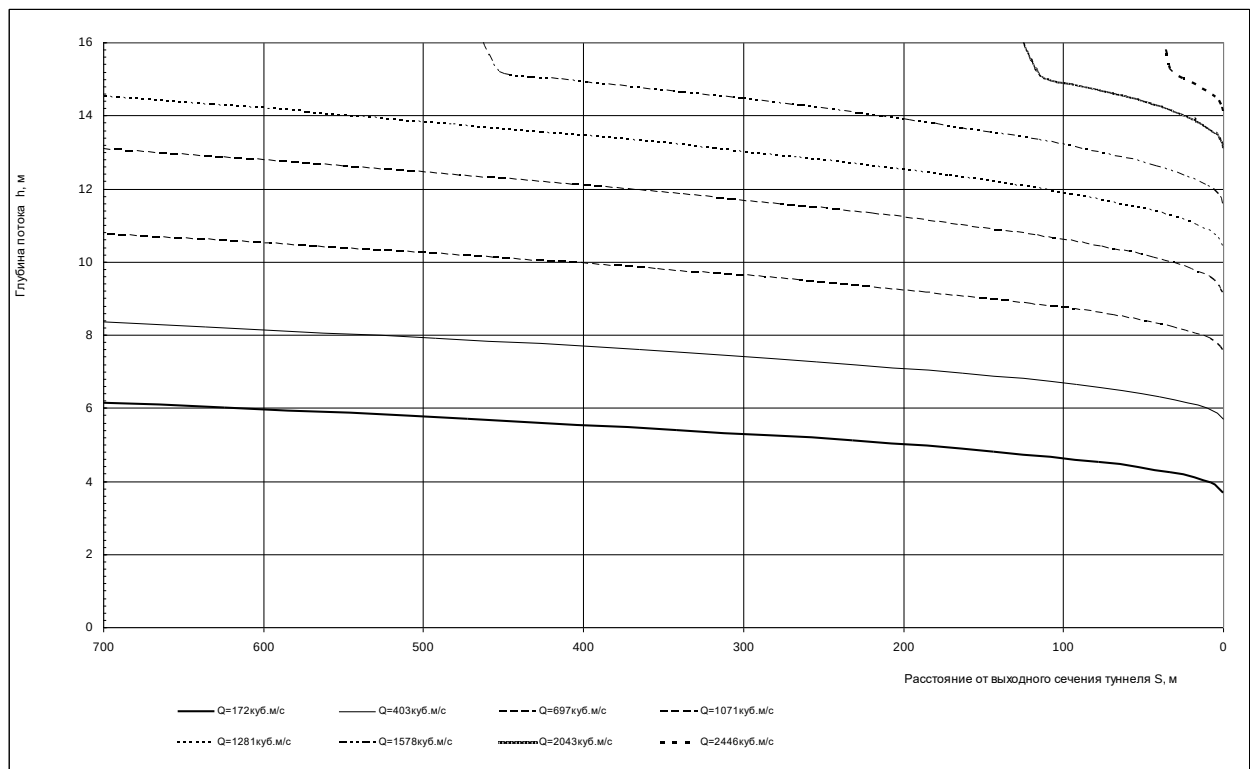


Рисунок 2.11 - Кривые спада в отводящем туннеле диаметром $d=16.0\text{м}$ с уклоном $i=-0.001$

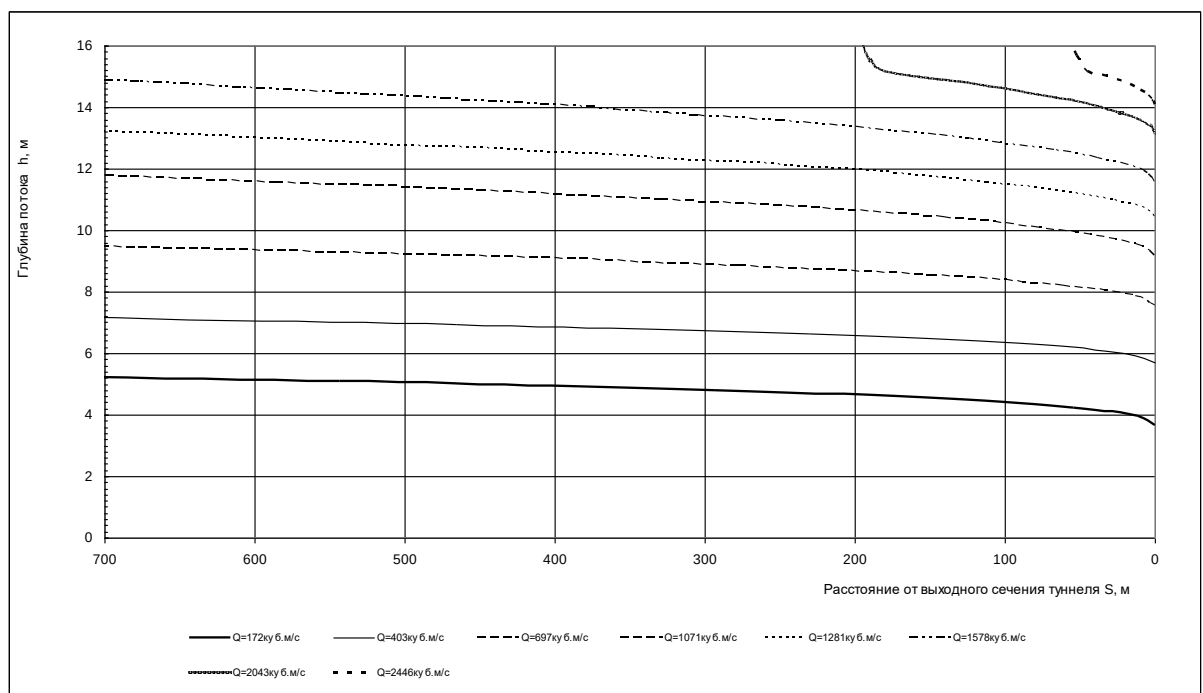


Рисунок 2.12 - Кривые спада в отводящем туннеле диаметром $d=16.0\text{м}$ с уклоном $i=+0.0005$

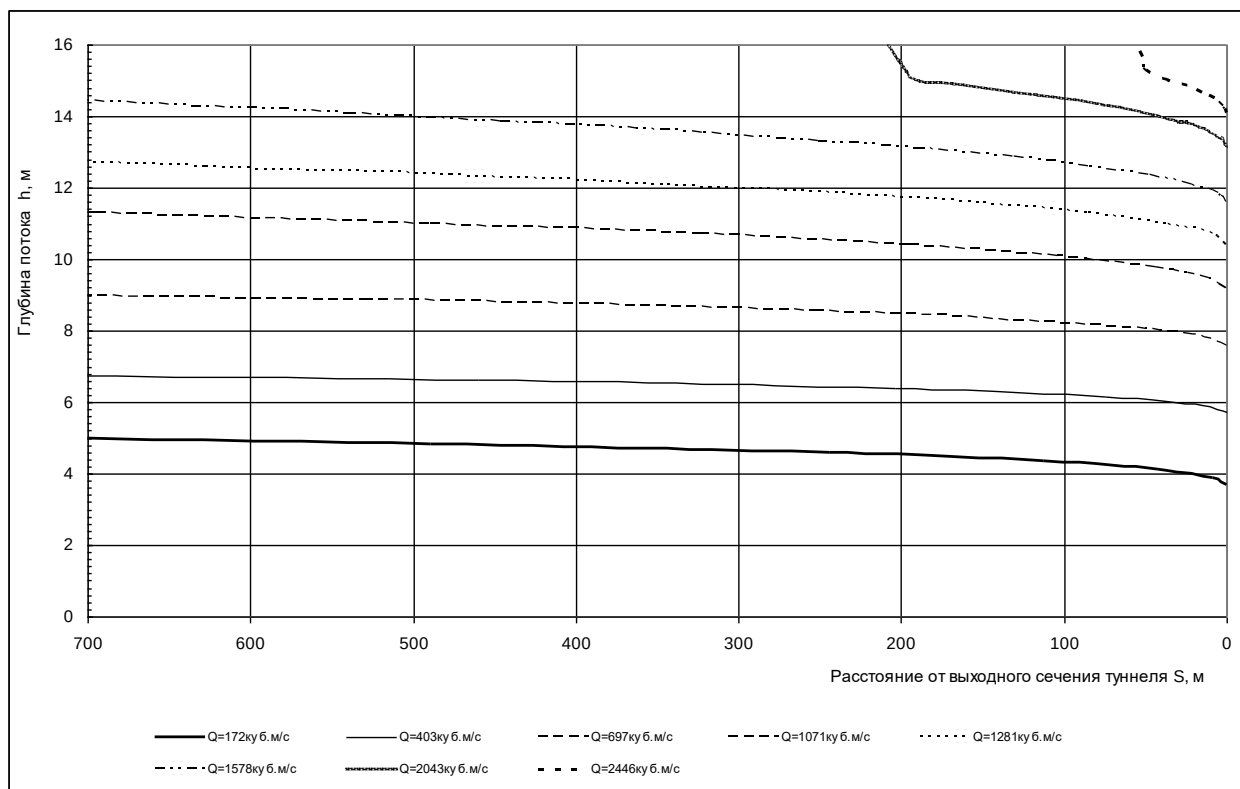


Рисунок 2.13 - Кривые спада в отводящем туннеле диаметром $d=16.0\text{ м}$ с уклоном $i=+0.001$

2.2. Теоретическое обоснование работы вакуумного шахтного гасителя энергии

2.2.1. Влияние гидростатического давления воды и температуры на предельную концентрацию газов в условиях вакуума

Гидротехнические сооружения высокого напора, такие как водосбросы ГЭС, туннели и трубопроводы, сталкиваются с фундаментальной проблемой диссипации колоссальной кинетической энергии потока. Традиционные методы - водобойные колодцы, гидравлические прыжки или многоступенчатые перепады - эффективны, но сопряжены с интенсивной аэрацией воды, кавитационной эрозией бетона и значительными энергетическими потерями на трение о воздух [9, 29, 30, 53, 71, 75].

Решением данной проблемы является вакуумный шахтный гаситель энергии. Принципиальная идея его работы заключается в полной изоляции внутреннего объема шахты от атмосферного воздуха. В отсутствие воздушной

подушки процесс торможения потока происходит исключительно за счет гравитационного падения столба воды в среде с пониженным давлением. Однако создание вакуума над зеркалом падающей жидкости неизбежно запускает сложные термодинамические и массообменные процессы. Вода, будучи естественным растворителем, начинает активно выделять содержащиеся в ней газы. Предельная концентрация этих газов в газовой фазе шахты определяется балансом между скоростью десорбции из жидкой фазы и механическим удалением неконденсирующихся компонентов [23, 30, 88].

Способность воды удерживать газы описывается законом Генри. Согласно ему, при постоянной температуре равновесная массовая концентрация газа C , растворенного в жидкости, прямо пропорциональна его парциальному давлению P над поверхностью этой жидкости:

$$C = k_H * P, \quad (2.17)$$

где k_H — коэффициент Генри, специфичный для каждой пары «газ-жидкость» и зависящий от температуры.

В нормальных атмосферных условиях ($P_{atm} \approx 101325$ Па) парциальное давление каждого компонента воздуха (азота, кислорода, аргона) составляет определенную долю от общего давления. Например, для азота оно равно примерно 78 кПа. При создании глубокого вакуума в стволе шахты общее давление P_{total} падает до значений порядка 1–5 кПа. Парциальное давление газов стремится к нулю, что создает гигантский градиент концентрации. Растворимость газов падает практически пропорционально падению давления. Если вода поступает в шахту с естественной степенью насыщения воздухом (около 100% при атмосферном давлении), то при попадании в зону низкого давления она становится пересыщенной [89]. Избыточный газ выделяется в виде пузырьков, формируя пограничный слой высокой концентрации у поверхности раздела фаз [30, 97, 98, 99].

Однако закон Генри описывает лишь статическое равновесие. В динамике вакуумной шахты необходимо учитывать время релаксации процесса дегазации.

Скорость выделения газа зависит от коэффициента диффузии молекул в воде, площади межфазной поверхности (которая резко возрастает при турбулизации падающего потока) и интенсивности перемешивания. В условиях свободного падения струй внутри шахты площадь контакта увеличивается экспоненциально, что приводит к почти мгновенному достижению нового, смещенного равновесия по сравнению со спокойным состоянием водоема [30, 58].

На первый взгляд может показаться, что гидростатическое давление ρgh (где ρ — плотность воды, g — ускорение свободного падения, h — глубина) должно способствовать удержанию газов в растворе согласно тому же закону Генри. На глубине 10 метров избыточное давление составляет около 1 атмосферы, что теоретически удваивает растворимость. Однако применительно к работе вакуумного гасителя этот фактор имеет более сложное, двоякое значение.

Во-первых, критическую роль играет профиль давления по высоте шахты. В верхней части шахты, где зеркало воды только формируется после отделения от подводящего напорного водовода, абсолютное давление минимально. Именно здесь происходит наиболее бурная спонтанная декомпрессия. Пузырьки газа зарождаются преимущественно в верхних слоях. По мере погружения пузырька на глубину h внешнее давление на него растет. Согласно уравнению состояния идеального газа (в первом приближении), объем пузырька V обратно пропорционален давлению:

$$V_1 * P_1 = V_2 * P_2 \Rightarrow V_{(h)} = (V_0 * P_{top}) / (P_{top} + \rho gh). \quad (2.18)$$

Таким образом, гидростатическое давление вызывает коллапс газовых включений. Пузырек, поднявшийся из толщи воды к поверхности и выделившийся в газовую шапку шахты, увеличивает свое давление лишь до уровня P_{total} в пустоте. Но пузырек, оставшийся захваченным в массе падающей воды, стремительно сжимается под весом вышележащего столба. Это явление выполняет полезную функцию: гидростатика принудительно возвращает часть выделившегося газа обратно в растворенное состояние, повышая локальную плотность воды и предотвращая образование устойчивых газоводяных эмульсий,

которые могли бы нарушить сплошность потока и снизить эффективность гашения энергии [30].

Во-вторых, гидростатическое давление определяет положение зоны максимальной турбулентности [57, 59]. В классическом водобойном колодце удар струи о дно создает область экстремального перемешивания, способствующую выбросу всех растворенных газов. В вакуумном шахтном гасителе энергии поток тормозится плавно, распределяясь по периметру шахты восходящими токами. Гидростатический столб выступает в роли демпфера. Давление у дна шахты всегда выше, чем у зеркала, даже при глубоком вакууме сверху. Это создает стабильный вертикальный градиент плотности, который препятствует конвективному подсосу газовой фазы вниз, в область входного сечения отводящего водовода.

Температура оказывает на предельную концентрацию газов двоякое воздействие: через изменение константы закона Генри и через прямое термическое расширение. Растворимость газов в воде экзотермична [30]. С ростом температуры коэффициент k_H уменьшается. Тепловое движение молекул воды преодолевает силы Ван-дер-Ваальса, удерживающие молекулы газа в полостях квазикристаллической структуры воды.

Математически эта зависимость часто аппроксимируется уравнением Вант-Гоффа:

$$\ln\left(\frac{k_{H2}}{k_{H1}}\right) = -\frac{\Delta H_{sol}}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right), \quad (2.19)$$

где: ΔH_{sol} — энтальпия растворения (для большинства газов в воде положительна), R — универсальная газовая постоянная.

Для инженерных расчетов важно помнить эмпирическое правило: при повышении температуры воды на каждые 10 градусов Цельсия растворимость воздуха в ней падает примерно на 60% [25, 30]. В гидротехнических сооружениях температура воды редко опускается ниже 4 °С. Летом поверхностные слои водохранилищ могут прогреваться до 20–25 °С. Вода, поступающая в вакуумную шахту летом, несет в себе значительно меньший запас растворенного газа по

сравнению с зимней водой, однако относительная доля газа, которая будет вынуждена выделиться при падении давления с 100 кПа до 3 кПа, остается огромной в обоих случаях.

Второй аспект — температурная стратификация самой газовой фазы шахты. Процесс падения миллионов тонн воды в гравитационном поле сопровождается превращением потенциальной энергии в кинетическую, а затем — в тепло за счет вязкого трения слоев воды друг о друга и о стенки шахты. Адиабатическое сжатие газа в нижней части шахты также генерирует тепло. Если ствол шахты недостаточно эффективно термоизолирован или охлаждается массивом горных пород, возникает температурный градиент: теплый, расширившийся газ скапливается в верхней части, а более холодная и плотная паровоздушная смесь находится внизу. Поскольку давление в системе выравнивается, именно нижние, холодные слои будут иметь наименьшее парциальное давление неконденсирующихся газов, что создает риск формирования зон локального подсоса воздуха через возможные неплотности нижних уплотнений.

Особого внимания заслуживает фазовый переход воды. При глубоком вакууме температура кипения воды падает. Если температура воды в шахте превышает точку росы для данного остаточного давления, начинается активное испарение. Водяной пар ведет себя иначе, чем постоянные газы (азот, кислород). Он способен конденсироваться на стенках шахты или каплях воды, тем самым снижая общее давление и создавая эффект насоса, поддерживающего вакуум. Однако теплота парообразования, отбираемая у основной массы воды, дополнительно охлаждает ее, парадоксальным образом повышая способность оставшейся воды удерживать азот и кислород. Возникает сложная нелинейная связь: нагрев от трения стимулирует дегазацию постоянных газов, но сопутствующее испарительное охлаждение частично компенсирует этот эффект.

Взаимосвязь гидростатического давления и температуры определяет физический предел эффективности вакуумных технологий в гидравлике. Температура выступает катализатором дегазации: чем теплее вода, тем агрессивнее она заполняет верхнюю часть шахты неконденсирующимися газами,

стремясь поднять общее давление до атмосферного. Гидростатическое давление, напротив, выступает стабилизирующим фактором, принуждая газовые включения к растворению в глубинных слоях и защищая выходной тракт от захвата газовой фазы.

Проектирование вакуумного шахтного гасителя энергии требует строгого учета этих эффектов. Принципиальная схема с изоляцией от атмосферы, напорным подводом и обратным уклоном отводящего тракта является прямым инженерным ответом на вызовы термодинамики. Горизонтальные затворы обеспечивают чистую границу фазового перехода, а занепопиривание водоотвода создает непреодолимый для газовой смеси гидростатический порог. Понимание того, как падение давления до 2–5 кПа в сочетании с рабочей температурой воды меняет её плотность и газонасыщенность, позволяет точно рассчитать геометрию шахты, необходимую для предотвращения кавитации на затворах и обеспечения гарантированного гашения энергии потока любой мощности. Дальнейшее развитие таких конструкций может лежать в области активного управления температурным режимом стенок шахты для стимуляции конденсации водяного пара и поддержания стабильно низкого парциального давления постоянных газов.

2.2.2. Теоретическое обоснование вакуумного гасителя энергии

Одним из самых затратных видов созидательной деятельности человека является гидротехническое строительство. Остатки наиболее старых гидроузлов обнаружены в Израиле, время возведения некоторых из них датируется 3200 г. до нашей эры. Известны остатки гидротехнических сооружений, построенных в Египте, Китае, Западной Европе. Примером выдающегося гидротехнического сооружения является плотина Корнальво, построенная римлянами в середине II в. н. э. в Испании и действующая по настоящее время, схематический поперечный разрез которой по водосбросу показан на рисунке 2.14 [109].

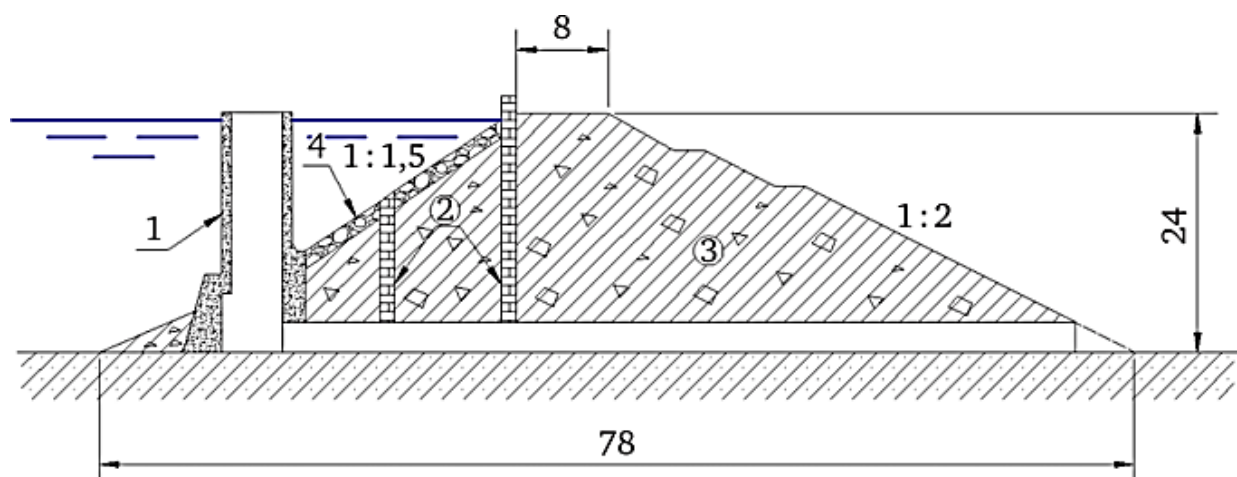


Рисунок 2.14 - Поперечное сечение плотины Корнальво (размеры в метрах):

1 — шахтный водосброс; 2 — система продольных и поперечных стенок из каменной кладки; 3 — глинистый грунт с включением камня; 4 — крепление откоса тесаным камнем (размеры указаны в м)

Причиной такой превосходной оценки является не только успешный опыт эксплуатации гидротехнического сооружения в течение без малого двух тысяч лет, но и конструкция, во многом отвечающая современным представлениям. По оценочным расчётам, шахтный водосброс с поперечным сечением 4,5 х 4,5 м может пропускать максимальный расход до 50 м³/с [38, 39].

Каждый речной гидроузел, как правило, включает в себя три основных сооружения: водоподпорную (водоподъёмную) плотину; водозаборное сооружение и водосбросное сооружение [106].

Водоподъёмное сооружение в виде глухой плотины предназначено для создания запаса воды, расходуемой в маловодный период, либо для подъёма уровня перед ней для использования запасённой потенциальной энергии водяными агрегатами. Водозаборное сооружение предназначено для забора необходимого количества воды из водохранилища с целью подачи его водопотребителям.

Водосбросное сооружение предназначено для сброса излишков воды в многоводные периоды. При этом водозаборные и водосбросные сооружения проектируются с выполнением противоположных требований. Водозаборные

сооружения должны 100% гарантировать снабжение водой потребителя, поэтому они рассчитываются на забор воды в наиболее маловодные периоды. Водозаборные сооружения обеспечивают надёжную работу гидроузла при прохождении половодья или паводков редкой повторяемости.

У древних гидростроителей не имелось данных о закономерностях формирования поверхностного стока, в связи с чем, они не могли запроектировать надёжные водосбросные сооружения, из-за чего практически все построенные плотины древности с течением времени были разрушены. И только с зарождением гидрологии как науки появилась возможность проектировать надёжно работающие гидротехнические сооружения.

Однако, строительство водосбросных сооружений, рассчитанных на пропуск больших расходов редкой повторяемости, потребовало больших капитальных затрат на их возведение. Поэтому вся история гидротехнического строительства представляет собой борьбу за снижение стоимости водосбросных сооружений. К этому добавляется вопрос надёжного гашения энергии сбрасываемых холостых расходов воды, обеспечивающий безопасность работы всего гидроузла. Устройства для гашения сбрасываемых расходов воды являются неотъемлемой частью водосбросных сооружений. И здесь снова требования к проектированию водосбросных сооружений и их энергогасящих устройств вступают в противоречия. Для снижения стоимости водосбросного сооружения необходимо уменьшить его ширину, для чего надо увеличить удельные расходы. Но повышение удельных расходов влечёт за собой увеличение размеров и стоимости энергогасящих конструкций и повышает опасность размыва грунта в нижнем бьефе, создавая предпосылки для разрушения гидроузла.

Одним из возможных путей уменьшения стоимости водосбросного сооружения и повышения безопасности работы гидроузла является уменьшение энергии сбрасываемого потока на выходе из водоотводящего водовода за счёт частичного гашения энергии сбрасываемого потока по пути его движения в водопроводящем тракте. Эта идея в последние десятилетия осуществляется использованием принципа циркуляции потока. При прохождении воды через

специально запроектированные циркуляционные камеры происходит вращение потока в поперечном сечении отводящего водовода. При этом возникают высокие градиенты эпюры скоростей, которые создают высокие градиенты касательных напряжений и расходуют большое количество энергии потока, снижая тем самым энергию потока на выходе из отводящего водовода.

При всей привлекательности такого способа гашения энергии, он имеет ряд существенных недостатков:

1. Узлы закрутки потока сложны в техническом исполнении и имеют высокую стоимость.

2. При закрутке потока создаются высокие пристенные скорости воды, достигающие 50 м/с, которые являются источником физического разрушения бетона, для защиты которого стенки отводящего водовода приходится облицовывать металлом.

3. При циркуляции потока возникают зоны с глубоким вакуумом, для срыва которого необходимо в поток подводить воздух. В зоне раскрутки потока этот воздух стремится под потолком отводящего водовода двигаться против потока. Собирая воздушные мешки, воздух создаёт лобовое сопротивление, воздействуя на которое, поток выносит эти мешки из отводящего водовода. На выходе из водовода, выходящий воздух создаёт шумовые эффекты и является причиной гидравлических ударов в водоводе, приводящих в ряде случаев к разрушению бетонной обделки.

Чтобы избежать формирования высокоскоростного потока в отводящем водоводе водосбросного сооружения в 1985 году было предложено строительство в теле плотины шахты с вертикальным водобойным гасителем перед входным сечением отводящего водовода. Конструкция такой шахты показана на рисунке 2.15.

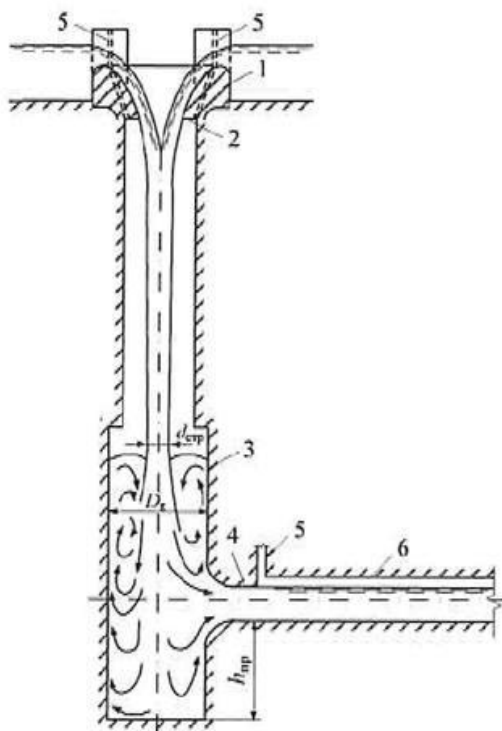


Рисунок 2.15 - Шахтный водосброс с цилиндрическим шахтным гасителем энергии потока

1-кольцевая воронка; 2- уступ для подвода воздуха; 3 – цилиндрический (шахтный) гаситель энергии; 4 – забральная стенка; 5 – воздухопроводы; 6 – отводящий тракт

По существу, предложенный шахтный водосброс представляет развитие конструкции шахтного водосброса гидроузла Корнальво. В дальнейшем эта конструкция шахтного водосброса с некоторыми модификациями отражена в работах, и даже вошла в нормативный документ. Однако, каких-либо рекомендаций по проектированию и гидравлическому расчёту в доступной литературе не имеется [38, 39, 106].

Основным недостатком этой конструкции водосброса является захват падающим потоком воздуха в больших количествах, в 2...3 раза превосходящим расход воды. Для обеспечения движения образующейся водо-воздушной смеси с безнапорным режимом движения воды в отводящем тракте необходимо увеличивать его поперечное сечение. В противном случае, при пропуске сбрасываемого расхода воды, возникнут те же проблемы при пропуске воздуха.

Продольный разрез принципиальной схемы водосбросного тракта с вакуумной шахтой приведен на рисунке 2.16. Отличие конструкции вакуумного шахтного гасителя энергии от вертикального шахтного гасителя состоит в том, что к верхнему торцу шахты вода подводится водоводом, работающим в напорном режиме. Напорный режим в подводящем водоводе обеспечивается горизонтальными затворами, установленными в конце подводящего водовода. Для изоляции шахты от атмосферного воздуха отводящий водовод выполняется с обратным уклоном, что обеспечивает занепокоривание водовыпускного отверстия шахты уже при минимальных расходах водосброса [39, 106].

Принципиальная идея работы вакуумного шахтного гасителя энергии потока заключается в том, что ствол шахты изолирован от доступа в неё атмосферного воздуха. Поэтому в конструкции отсутствуют воздуховоды. Для предупреждения поступления воздуха из подводящего водовода к верхнему торцу шахты вода подводится водоводом, работающим в напорном режиме. Напорный режим в нем обеспечивается горизонтальными затворами, установленными в конце подводящего водовода. Для предупреждения поступления воздуха из отводящего водовода дно водоотводящего тракта выполнено с обратным уклоном. При такой конструкции водоотводящего тракта обеспечивается занепокоривание его входного сечения, что предотвращает поступление воздуха в шахту. Дополнительным преимуществом такого исполнения водоотводящего тракта является создание благоприятных гидравлических режимов его работы во всём диапазоне пропускаемых расходов. При пропуске малых расходов происходит занепокоривание начального участка водоотводящего тракта, за которым формируется кривая спада с критической глубиной в концевом сечении. По мере нарастания расходов занепокоренный участок продвигается к выходному сечению. Таким образом, на выходе из водоотводящего тракта при всех режимах формируется поток с минимальной энергией [39].

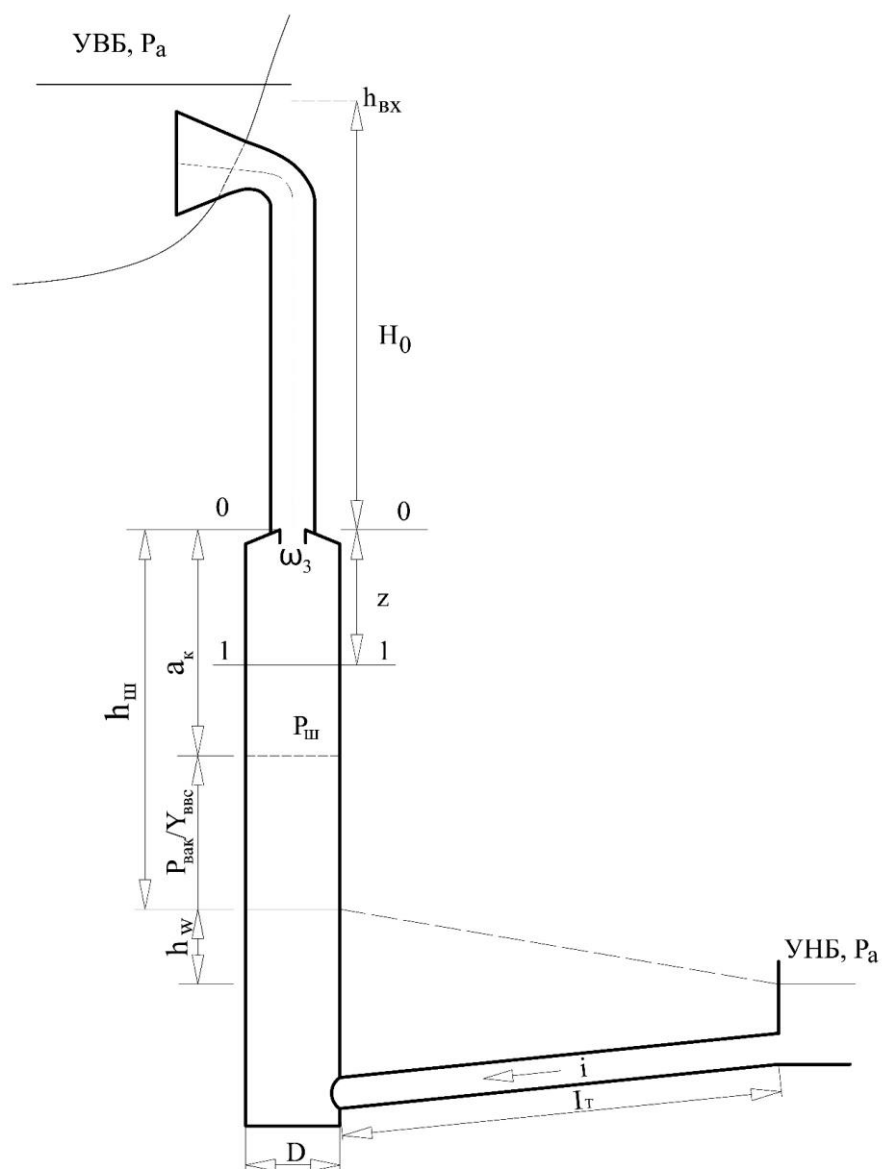


Рисунок 2.16 - Принципиальная схема продольного разреза водосбросного тракта с вакуумной шахтой

На схеме рисунка 2.16 приняты следующие обозначения:

УВБ, УНБ – уровни верхнего и нижнего бьефов;

P_a - атмосферное давление;

h_{BX} - гидравлические потери на подводящем водоводе от верхнего бьефа до сечения 0-0, в котором подводящий водовод присоединяется к верхнему торцу

шахты и в котором размещаются горизонтальные затворы (условно не показанные);

h_w - гидравлические потери на отводящем водоводе от шахты до нижнего бьефа, включающие местные потери на вход, выход и потери по длине отводящего водовода;

$P_{\text{вак}}/\gamma_{\text{ввс}}$ - высота подъёма уровня водовоздушной смеси в шахте под действием вакуума $P_{\text{вак}}$;

$\gamma_{\text{ввс}}$ - плотность водовоздушной смеси в шахте;

a_k – высота шахты над уровнем водовоздушной смеси;

$h_{\text{ш}}$ - высоты шахты над уровнем воды, необходимым для пропуска расхода $Q_{\text{вод.}}$;

1-1 – текущее сечение шахты;

z – высота падения воды от выходного сечения затвора до сечения 1-1;

H_0 – напор над выходным сечением затвора;

ω_z – площадь открытия затворов;

D – диаметр ствола шахты;

l_t – длина отводящего туннеля;

i – уклон отводящего туннеля.

При выносе воздуха падающим в шахту потоком в ней начинает формироваться вакуум. Максимальный вакуум, который может быть достигнут в шахте, должен быть равен атмосферному давлению, и может быть определён по зависимости [39, 85, 106]:

$$\frac{p_{\text{вак}}}{\rho \cdot g} = 10,33 - \frac{z}{900} - \frac{p_{\text{бар}}}{\rho \cdot g} - \frac{p_{\text{нас}}}{\rho \cdot g}, \quad (2.21)$$

где: $p_{\text{вак}}$ – величина максимального вакуума в шахте;

10,33 – нормальное атмосферное давление на уровне моря;

∇z – абсолютная отметка местоположения сооружения;

$\nabla z/900$ – поправка на превышение данной точки над уровнем моря;

$p_{\text{бар}}/\rho \cdot g \approx 0,39\text{м}$ – поправка на максимальное барическое давление за счёт метеорологических факторов;

$p_{нас}$ – давление насыщающих водяных паров при холодном закипании воды;
 ρ – плотность воды.

Расчёты выделения газов, содержащихся в объёме воды сбрасываемого расхода и процессы, происходящие при этом, рассмотрим на примере использования вакуумного шахтного водосброса, применительно к условиям Рогунской ГЭС, применительно к упрощённой принципиальной схеме водосброса с вакуумной шахтой, представленной на рисунке 2.16.

При открытии затвора на величину ω_3 через подводящий водовод пойдёт расход Q :

$$Q = \varphi \cdot \varepsilon \cdot \omega_3 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_o - h_w)} \quad (2.2)$$

со скоростью V_3 в сжатом сечении за затвором

$$V_3 = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_o - h_w)}. \quad (2.3)$$

В сечении 1-1 на расстоянии z от выходного сечения затворов струя приобретёт скорость.

Скорость падения на расстоянии z от сжатого сечения за затвором:

$$V_z = \sqrt{V_3^2 + 2 \cdot g \cdot z}. \quad (2.4)$$

Время прохождения расстояния dz в сечении 1-1 на расстоянии z от выходного сечения затворов:

$$dt_z = \frac{dz}{V_z} = \frac{dz}{\sqrt{V_3^2 + 2 \cdot g \cdot z}}, \quad (2.5)$$

а время прохождения расстояний z (время падения воды от выходного сечения затворов) составит:

$$t_z = \int_0^{z_{\Pi}} \frac{dz}{V_z} = \int_0^{z_{\Pi}} \frac{dz}{\sqrt{V_3^2 + 2 \cdot g \cdot z}} = \sqrt{\frac{V_3^2}{g^2} + \frac{2 \cdot z_{\Pi}}{g}} - \frac{V_3}{g} \quad (2.6)$$

На рисунке 2.17 представлен график зависимости времени падения воды от выходного сечения затворной камеры до свободной поверхности воды в вакуумной шахте, обеспечивающей пропуск расхода в отводящем водоводе.

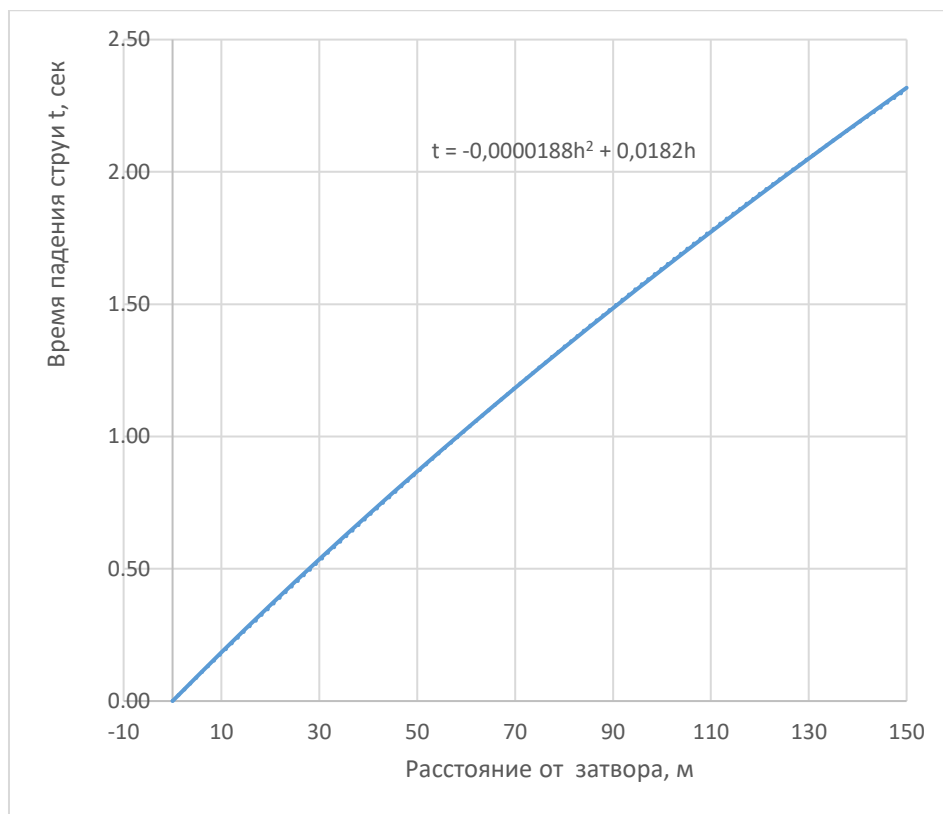


Рисунок 2.17 - График зависимости времени падения воды от выходного сечения затворной камеры до уровня воды в шахте

Вакуум в шахте создаётся защемлением воздуха и выносом его в отводящий водовод падающим из затвора потоком. При уровне воды в шахте выше входного отверстия отводящего водовода, вынос воздуха будет сопровождаться сначала появлением вакуума в шахте, а затем углубления вакуума до абсолютного значения, определяемого высотным положением шахты на местности.

Изоляцию объёма шахты от атмосферы можно обеспечить двумя способами:

- размещением выходного сечения отводящего водовода под уровень нижнего бьефа;
- созданием обратного уклона такой величины, при котором щельга входного сечения отводящего водовода будет на уровне или ниже дна выходного сечения.

Спецификой работы этого сооружения после полного выноса воздуха из ствола шахты является резкое уменьшение давления в потоке за выходным

сечением затвора, которое приведёт к выделению растворённого в воде воздуха и уменьшению его концентрации в толще водного потока.

Растворимость газов в жидкостях и их выделение из растворов определяются следующими законами [38, 39, 85, 106]:

- законом Дальтона, определяющим зависимость растворения газов в жидкостях от температуры;
- законом Генри, определяющим зависимость растворения газов в жидкостях от давления газов;
- законом Бойля-Мариотта, определяющим соотношение объёма выделившегося газа и его давления для изотермического процесса изменения давления в газе;
- законами диффузии, в соответствии с которыми концентрация растворённого вещества стремится к равномерному распределению по всему объёму раствора. Главный механизм распределения растворённых в воде газов - диффузия, то есть растекание вещества из места его сосредоточения во все стороны пространства. Сущность диффузии состоит в том, что молекулы любого вещества, если их концентрация велика, стремятся проникнуть туда, где их мало. Диффузия продолжается до тех пор, пока концентрация молекул этого вещества не станет везде одинаковой.

Растворимость в воде воздуха, в основном как полигазовой смеси моногазов азота (N) и кислорода (O), определяется с учётом парциального давления при нормальном атмосферном давлении приведена на графиках рисунка 2.18 [38, 39, 106].

Зависимость растворимости газов в воде от давления определяется законом Генри: количество газа, растворённого при данной температуре в определённом объёме жидкости, при равновесии, прямо пропорционально давлению. Этот закон имеет вид:

$$C_p = C_o \cdot \frac{P}{P_o}, \quad (2.7)$$

где: C_p — массовая или объёмная концентрация газа в насыщенном растворе;

$C_o = f(t)$ — коэффициент пропорциональности, называемый константой Генри (или коэффициентом Генри), равный растворимости газа при атмосферном давлении и данной температуре воды;

P — парциальное давление газа, для которого определяется концентрация его растворения в жидкости;

P_o — парциальное давление газа, при котором определён коэффициент Генри.

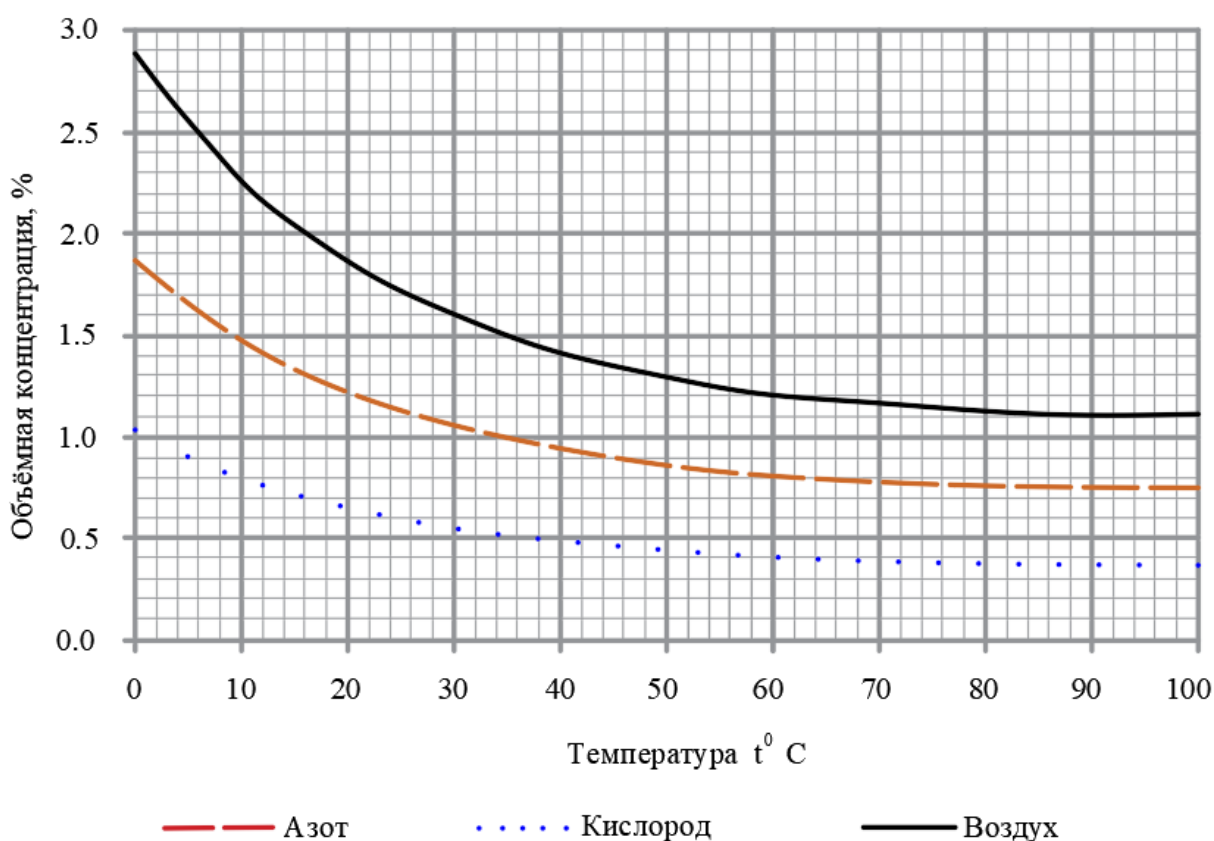


Рисунок 2.18 - Растворимость азота, кислорода и воздуха в воде в зависимости от температуры

В соответствии с этим законом, в зоне резкого понижения давления избыточное количество воздуха начинает интенсивно выделяться из воды подобно выделению газа из газированной воды. Количество выделившегося

воздуха из объёма воды $V_{\text{воз}}$ может быть определено в соответствии с законом (2.7):

$$V_{\text{воз}} = C_o \cdot V_{\text{вод}} \cdot \left(1 - \frac{P_i}{P_o}\right) \quad (2.8)$$

Одновременно, при выделении воздуха его объём увеличивается в соответствии с законом Бойля – Мариотта:

$$V_p \cdot P_o = V_i \cdot P_i, \quad (2.9)$$

где: V_p — объём выделившегося газа из насыщенного раствора при давлении P ;

V_i — объём газа в зоне понижения давления до величины давления P_i с учётом закона Бойля – Мариотта.

В соответствии с законами Генри и Бойля – Мариотта при выделении воздуха его относительный объём в потоке $V_i/V_{\text{вод}}$ составит:

$$V_{\text{воз}} = C_o \cdot V_{\text{вод}} \cdot \left(1 - \frac{P_i}{P_o}\right) \cdot \frac{P_o}{P_i}. \quad (2.10)$$

В последнее время появилось большое количество работ, посвящённых поведению воды в вакууме, и в частности, в космосе [38, 39, 106]. Но ни в одной из этих работ не уделено внимания влиянию выделения воздуха из воды при понижении давления. В экспериментах с постепенным понижением давления до закипания воды описываются режимы с удалением воздуха, расположенного над водой, включая и постепенно выделяющийся из воды воздух, а в гипотетических экспериментах с поведением воды в открытом космосе описывается поведение деаэрированной воды.

В описываемом случае при завершении выноса воздуха из шахты за выходным сечением затвора в шахте сформируется глубокий вакуум как в космосе, и в тоже время, благодаря поступлению расходов воды, будет поддерживаться температура, соответствующая температуре воды водоёма, питающего этот расход. При этом в космосе закипающая вода имеет возможность бесконечного расширения, а в вакуумной шахте будет происходить расширение выделяющегося из воды воздуха, ограниченное объёмом шахты между выходным

сечением затвора и свободной поверхностью воды над входным сечением отводящего водовода, определяемой величиной гидравлических потерь h_w в отводящем водоводе и величиной подъёма уровня под действием вакуума $(P_a - P_{ш})/\gamma_{ввс}$. После завершения переходного процесса выноса объёма воздуха из надводного пространства шахты, установится гидродинамический баланс объёма воздуха: падающей струёй будет выноситься весь объём воздуха, выделяющийся из объёма воды с расходом Q , поступающего в шахту за время падения струи от выходного сечения затвора до поверхности воды с уровнем, соответствующим пропуску этого расхода. На схеме рисунка 2.16 это расстояние будет соответствовать высоте $h_{ш}$. В соответствии с рисунком 2.17 это время составит $t = -0,0000188h^2 + 0,0182h$ секунд, а объём воздуха в струе будет определяться уравнением:

$$V_{воз} = C_o \cdot (-0,000018 \cdot h_{ш}^2 + 0,0182 \cdot h) \cdot Q. \quad (2.11)$$

где C_o – концентрация растворённого в воде воздуха, определяемая по верхнему графику рисунка 2.5 в зависимости от температуры воды.

Объём воздуха в шахте над этим уровнем воды составит: $\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h_{ш}$.

$$V_{ш} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h_{ш} - C_o \cdot (-0,000018 \cdot h_{ш}^2 + 0,0182 \cdot h) \cdot Q. \quad (2.12)$$

Весь этот объём будет занимать воздух, выделяющийся из воды. Соответственно формуле (2.10), давление в этом объёме составит $P_{ш}$:

$$\begin{aligned} P_{ш} &= P_o \cdot \frac{C_o \cdot (-0,000018 \cdot h_{ш}^2 + 0,0182 \cdot h) \cdot Q}{\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h_{ш} - C_o \cdot (-0,000018 \cdot h_{ш}^2 + 0,0182 \cdot h) \cdot Q} = \\ &= \frac{P_a}{\frac{\pi \cdot D^2 \cdot h_{ш}}{4 \cdot C_o \cdot (-0,000018 \cdot h_{ш}^2 + 0,0182 \cdot h) \cdot Q} - 1}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Давление $P_o = P_a$ в м. вод. ст. над поверхностью воды в шахте с учётом высотного положения сооружения и барического давления может быть определено по [85]:

$$P_a = 10,33 - \frac{z}{900} - P_{бар} = 10,33 - \frac{z}{900} - 0,39 = 9,94 - \frac{z}{900} \quad (2.14)$$

В качестве примера рассмотрим вариант водосброса строительных расходов 3-ей очереди Рогунской ГЭС с диаметром шахты $D=20,0$ м, расходом $Q = 1700$ м³/с, расположенный на высоте 1200 м над уровнем моря с атмосферным давлением $P_a=9,0$ м. вод. ст. Температура воды принята равной $+8^\circ\text{C}$. Высота падения воды из выходного отверстия затвора составляет $h_{\text{ш}}=150$ м.

В соответствии с (2.14), при начале выноса воздуха падающей струёй, давление воздуха в шахте будет составлять P_a :

$$P_a = 9,94 - \frac{1200}{900} = 8,6 \text{ м. вод. ст.}, \quad (2.15)$$

По графику рисунка 2.17 видно, что время падения воды на выходе из затворного отверстия в шахту составит $t_{\text{пад}} \approx 2,24$ секунды. За это время в шахту поступит объём воды $W_{\text{вод}}=1700 \cdot 2,24=3808$ м³. Из этого объёма воды выделится (пренебрегая малыми величинами высших порядков) $W_{\text{воз}}=3808 \cdot 2,4=91,4$ м³ воздуха. Объём шахты, в котором по закону Бойля-Мариотта сможет расширяться выделившийся из воды воздух, будет равен:

$$W_{\text{расш}} = W_{\text{шах}} - W_{\text{вод}} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{ш}}^2 \cdot H_{\text{ш}} - W_{\text{вод}} = 47100 - 3808 = 42292 \text{ м}^3 \quad (2.16)$$

Суммарный объём смеси выделившегося воздуха и воды составит $W_{\text{см}}=3808+91,4=3899,4$ м³. Учитывая равномерное распределение смеси по всему объёму шахты, её средняя плотность составит:

$$\gamma_{\text{см}} = \frac{W_{\text{см}}}{W_{\text{ш}}} = \frac{3899,4}{47100} = 0,0828 \text{ т/м}^3, \quad (2.17)$$

По графику рисунка 5 содержание воздуха в воде будет составлять 2,4%.

По формуле (2.13) получаем абсолютное давление в шахте $P_{\text{ш}}=0,0174$ м. вод. ст, а при плотности водовоздушной $\gamma_{\text{ввс}}=0,0174 \text{ т/м}^3$. Теоретически возможная высота столба водовоздушной смеси $h_{\text{ввс}}$ будет:

Высота подъёма смеси в шахте составит:

$$h_{\text{вак}} = \frac{P_a - P_{\text{ш}}}{\gamma_{\text{ввс}}} = \frac{8,6 - 0,0174}{0,0828} = 103,66 \text{ м.}, \quad (2.18)$$

При выделении растворённого в воде воздуха сплошная струя за выходом из затворных отверстий будет раздроблена выделяющимся и расширяющимся по закону Бойля - Мариотта воздухом на водовоздушную смесь с таким же объёмом. Откуда следует, что сразу за выходным сечением затвора произойдёт

раздробление струи, и по всей высоте ствола шахты будет происходить падение струи с раздробленным сечением. При этом следует иметь в виду, что вакуум за затвором будет осуществлять подсос воды, идентичный повышению напора на затворе, и при расчёте пропускной способности затвора следует учитывать в зависимости (2.1) поправку на вакуум:

$$Q = \varphi \cdot \varepsilon \cdot \omega_3 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_o + p_{\text{ш}} + h_w)} \quad (2.19)$$

Выводы по главе

Приведенная теоретическая информация о работе вакуумной шахты как гасителя энергии подтверждает гипотезу о возможности её применения на высоко- и средненапорных гидроузлах.

При дальнейших модельных исследованиях работы вакуумной шахты следует изучить следующие вопросы, которые не освещены в специальной «гидравлической» литературе:

- вопрос влияния аэрации потока на величину местных гидравлических потерь;
- работу туннеля с обратным уклоном;
- влияние аэрации потока на величину потерь по длине.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ШАХТНОМ ВОДОСБРОСЕ

Шахтные водосбросы представляют собой один из наиболее эффективных типов гидротехнических сооружений для пропуска катастрофических паводков в условиях стеснённой горной местности. Конструктивно такое сооружение включает водосливную воронку, переходный участок, вертикальную или наклонную шахту, колено и отводящий туннель. Критическим элементом, определяющим надёжность всей системы, является нижний бьеф — устройство для гашения кинетической энергии потока, поступающего из шахты со скоростями, достигающими 30–50 м/с. Традиционные водобойные колодцы при столь высоких напорах часто оказываются либо неэффективными, либо чрезмерно громоздкими, что обуславливает широкое применение шахтных гасителей энергии различных конструктивных типов (с центральным дефлектором, тангенциальные камеры закрутки и др.).

Гидродинамика двухфазного (воздух–вода) потока внутри шахты характеризуется высокой степенью турбулентности, наличием свободной поверхности, интенсивной аэрацией и сложными нестационарными вихревыми структурами. Современные численные методы (CFD-моделирование), несмотря на их стремительное развитие, пока не обеспечивают достаточной точности при описании процессов массообмена на границе раздела фаз и распределения пульсационных давлений на стенках в подобных режимах течения. В этой связи физическое моделирование остаётся единственным надёжным инструментом, позволяющим визуализировать гидравлические явления, измерить эпюры гидродинамического давления и определить коэффициенты расхода [103, 104].

Настоящая глава посвящена разработке и обоснованию методики проведения экспериментальных исследований на физической модели шахтного гасителя энергии в масштабе 1:100 с использованием системы пьезометрического зондирования.

3.1 Цели и задачи экспериментальных исследований

Основной целью физического моделирования являлось получение достоверных экспериментальных данных о гидродинамических характеристиках потока в элементах шахтного водосброса для последующего пересчёта их на натурные условия и обоснования оптимальных конструктивных параметров гасителя энергии [60].

Для достижения поставленной цели в ходе исследований решались следующие задачи:

1. Разработка и изготовление физической модели шахтного водосброса в масштабе 1:100, обеспечивающей соблюдение критериев гидродинамического подобия.
2. Оснащение модели пьезометрами для измерения распределения осреднённого гидродинамического давления по стенкам подводящего водовода, вертикальной шахты и отводящего туннеля.
3. Проведение серий экспериментов при различных режимных параметрах (расход воды, степень открытия затворов, расход подаваемого воздуха).
4. Обработка экспериментальных данных, построение эпюр давления и анализ влияния аэрации на динамику гидравлического режима в шахте и туннеле.

3.2 Объект и предмет исследования

Объектом исследования является гидравлическая система «подводящий водовод — затворная камера — вертикальная шахта — колодец — отводящий туннель» модели водосброса №3 Рогунской ГЭС.

Предметом исследования выступают закономерности распределения гидродинамического давления на стенках элементов шахтного гасителя энергии, а также влияние объёмного содержания воздуха на структуру потока.

3.3 Основы теории подобия

Для обеспечения корректного переноса результатов модельных испытаний на натуру необходимо соблюдение критериев гидродинамического подобия. Основным критерием для безнапорных и полунанпорных потоков в гидротехнике является число Фруда (Fr) [56, 60]:

$$Fr = V / \sqrt{g \cdot L}, \quad (3.1)$$

где: V — характерная скорость потока, м/с; g — ускорение свободного падения, м/с²; L — характерный линейный размер, м.

При соблюдении условия $Fr_m = Fr_n$ (индексы m — модель, n — натура) устанавливаются следующие масштабные соотношения для пересчёта основных гидравлических величин:

- **Линейные размеры:** $L_n = \alpha \cdot L_m$, где α — линейный масштабный коэффициент (в настоящем исследовании $\alpha = 100$).

- **Скорости:** V

- $V_n = \sqrt{\alpha} \cdot V_m$.

- **Расходы:** $Q_n = \alpha^{5/2} \cdot Q_m$.

- **Давления (по гидростатическому закону):** $p_n = \alpha \cdot p_m$.

- **Силы:** $F_n = \alpha^3 \cdot F_m$.

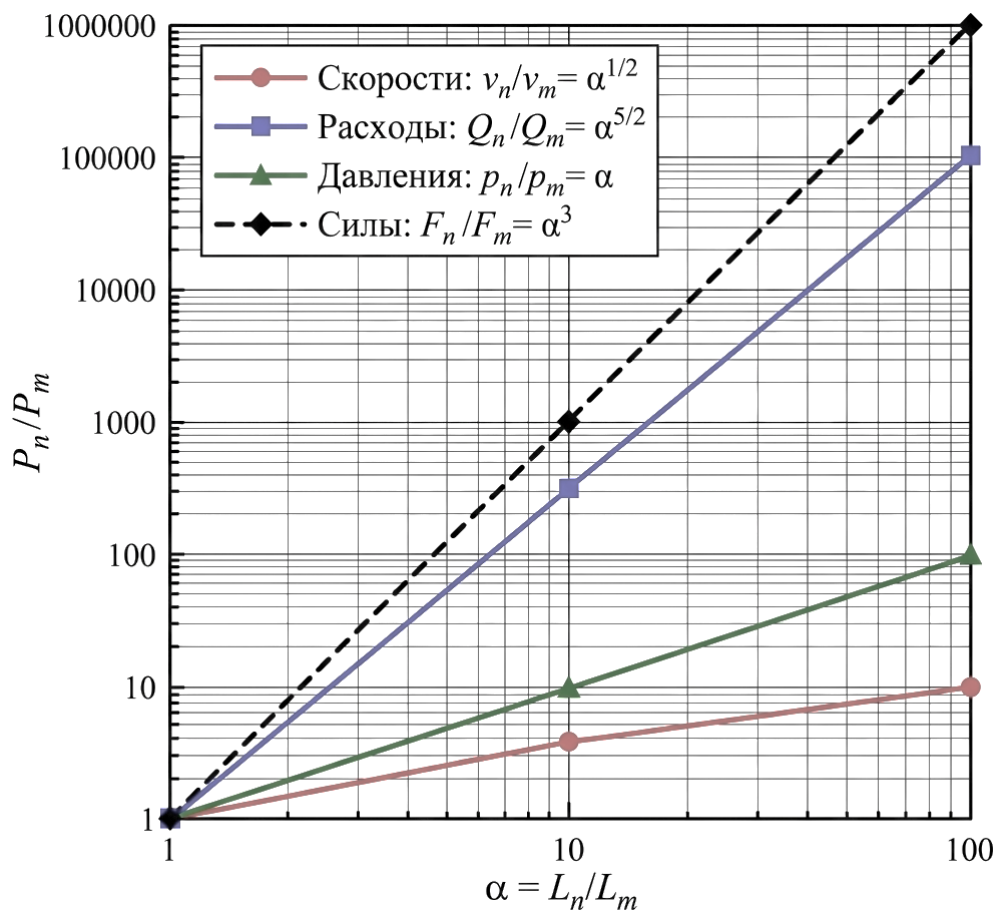


Рисунок 3.1 - Основные масштабные соотношения для пересчёта гидравлических параметров (графическое представление зависимостей V_n/V_m , Q_n/Q_m , p_n/p_m от линейного масштаба α)

3.4 Описание лабораторной установки и физической модели

Эксперименты проводились на физической модели в лаборатории водопропускных сооружений кафедры гидротехнических сооружений Российского государственного аграрного университета - МСХА имени К.А. Тимирязева на специализированном стенде производительностью до 250 л/с. Модель выполнена в масштабе 1:100 от натурной величины водосброса №3 Рогунского гидроузла.

На рисунке 3.2 показан схематический план размещения водосброса №3 в соответствии с техническим решением, позволяющие реализовать требования, предъявляемые к устройству гашения энергии потока применительно к условиям

Рогунской ГЭС, а на рис. 3.3 продольный разрез по оси левого отводящего туннеля.

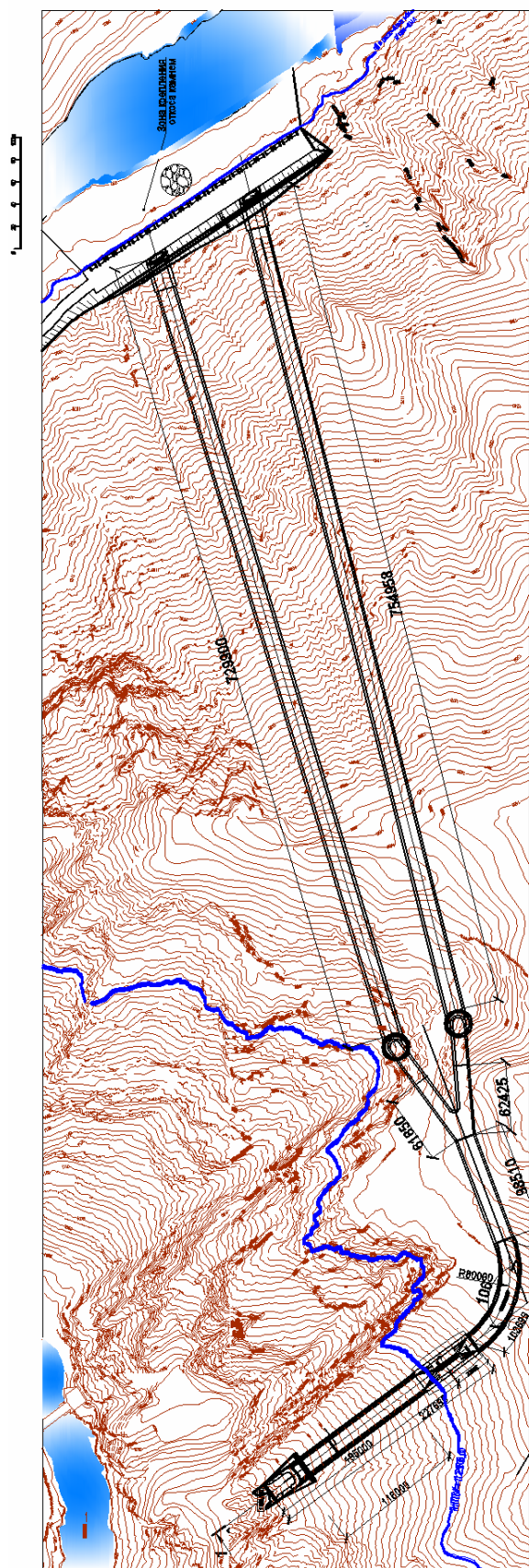


Рисунок 3.2 - План трассы водосброса №3

Разрез по
водобросному туннелю №3

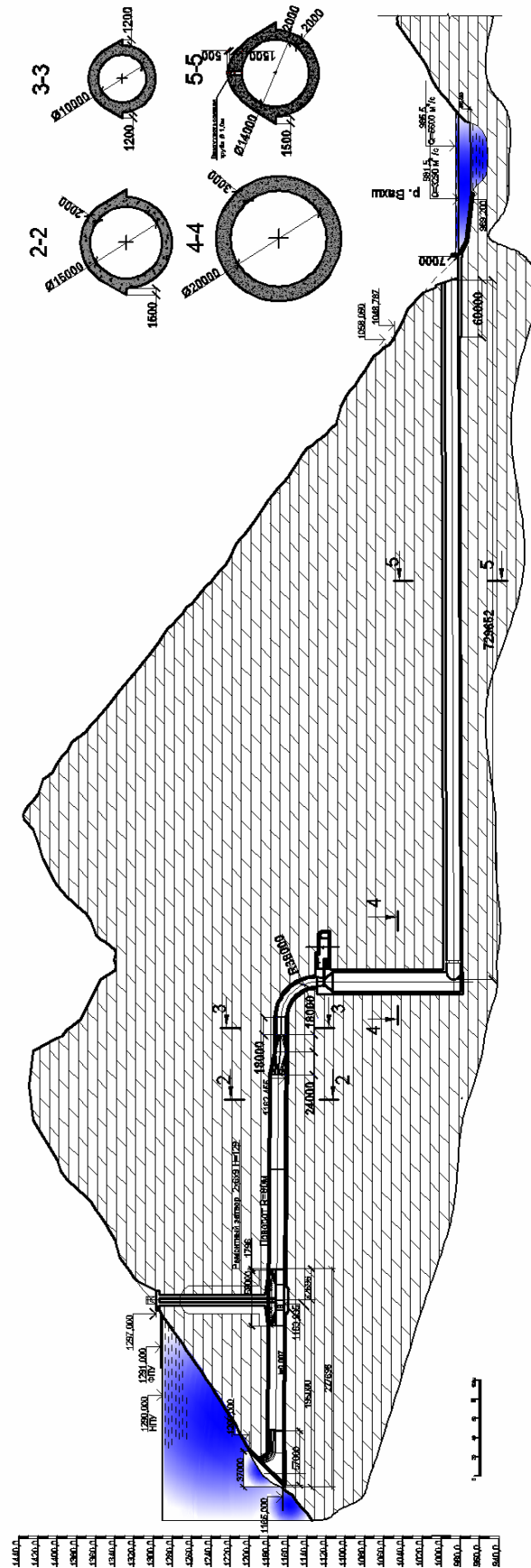


Рисунок 3.3 - Продольный разрез по оси левого отводящего туннеля

3.4.1 Конструкция модели

Модель изготовлена из органического стекла (полиметилметакрилата) толщиной 10 мм, что обеспечивает оптическую прозрачность и позволяет визуализировать структуру потока. Конструктивно модель состоит из следующих функциональных зон: питающего трубопровода; регулирующей задвижки; подводящего трубопровода; распределительного бака с треугольным мерным водосливом; напорного туннеля; горизонтального плоского затвора; шахты с диаметром 200 мм (исследовался и вариант шахты с колодцем); отводящего туннеля с диаметром 140 мм (исследовался и туннель с диафрагмой, установленный в его начале); воздухосборника прямоугольного поперечного сечения 10x10 мм, который соединялся с туннелем перфорацией в виде отверстий диаметром 6 мм, установленных через 600 мм; траншеи; распределительной стенки в конце туннеля; отводящего лотка. Принципиальная схема модельной установки представлена на рисунке 3.4 [3, 4, 5, 6, 7].

Для исследования процесса предварительного растекания потока разработана модель сопрягающего участка с прорезной стенкой, обеспечивающей дополнительное (к свободному) принудительное растекание (рис. 3.5). Фото модели приведено на рисунке 3.6. Общий вид модельной установки, ее головной участок и отводящий туннель, концевой участок представлены на рис. 3.4-3.8.

3.4.2 Система подачи воздуха

Для исследования влияния аэрации на гидродинамику потока реализована независимая система подачи воздуха в ствол шахты. Воздух подаётся через отверстие, расположенное в начале шахты под затворной камерой. Расход воздуха контролируется ротаметрами высокой точности (класс 1.0) и варьируется независимо от расхода воды, что позволяет исследовать влияние объёмного содержания воздуха (β) на гидродинамику потока.

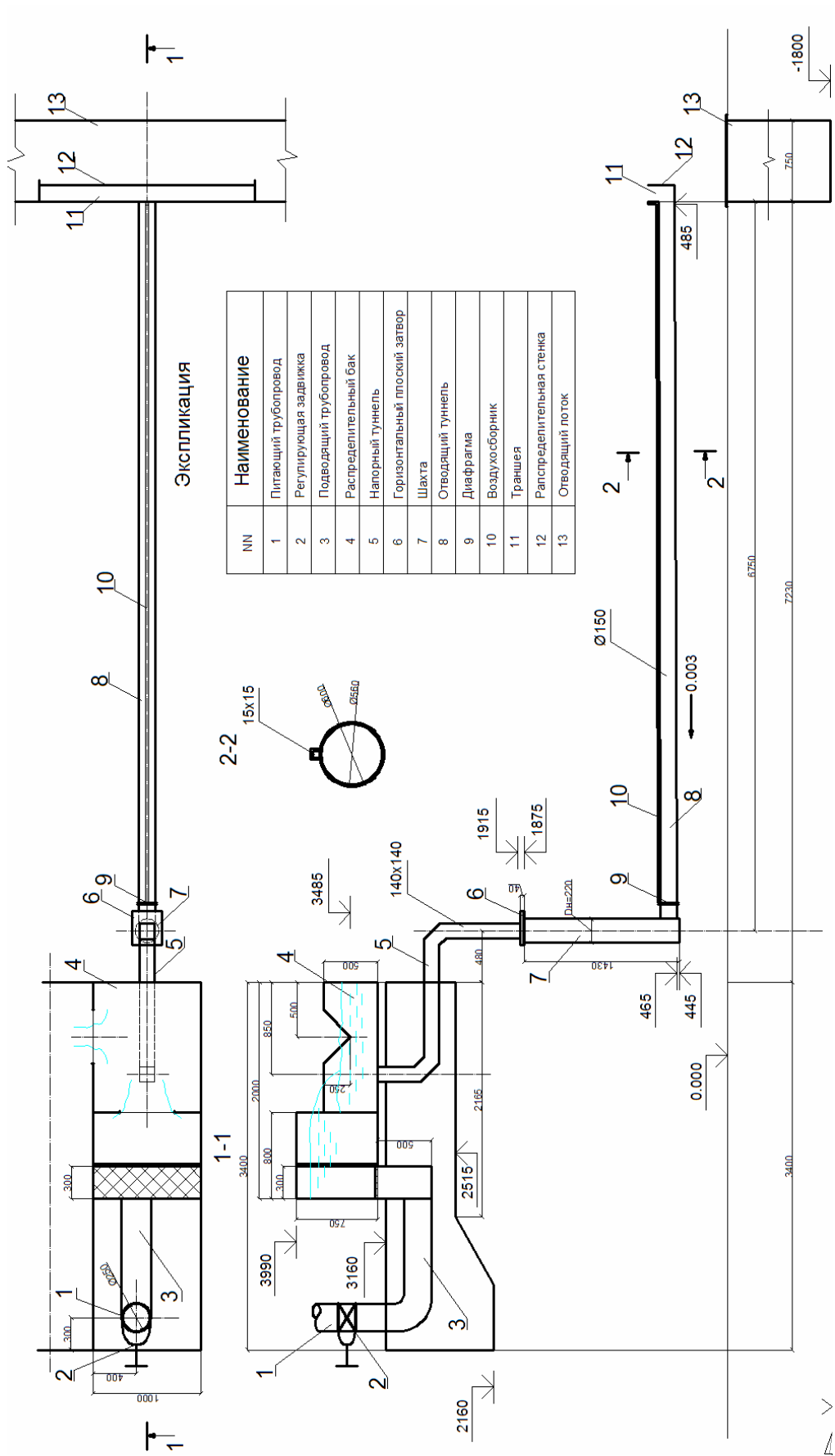


Рисунок 3.4 - Принципиальная схема модельной установки

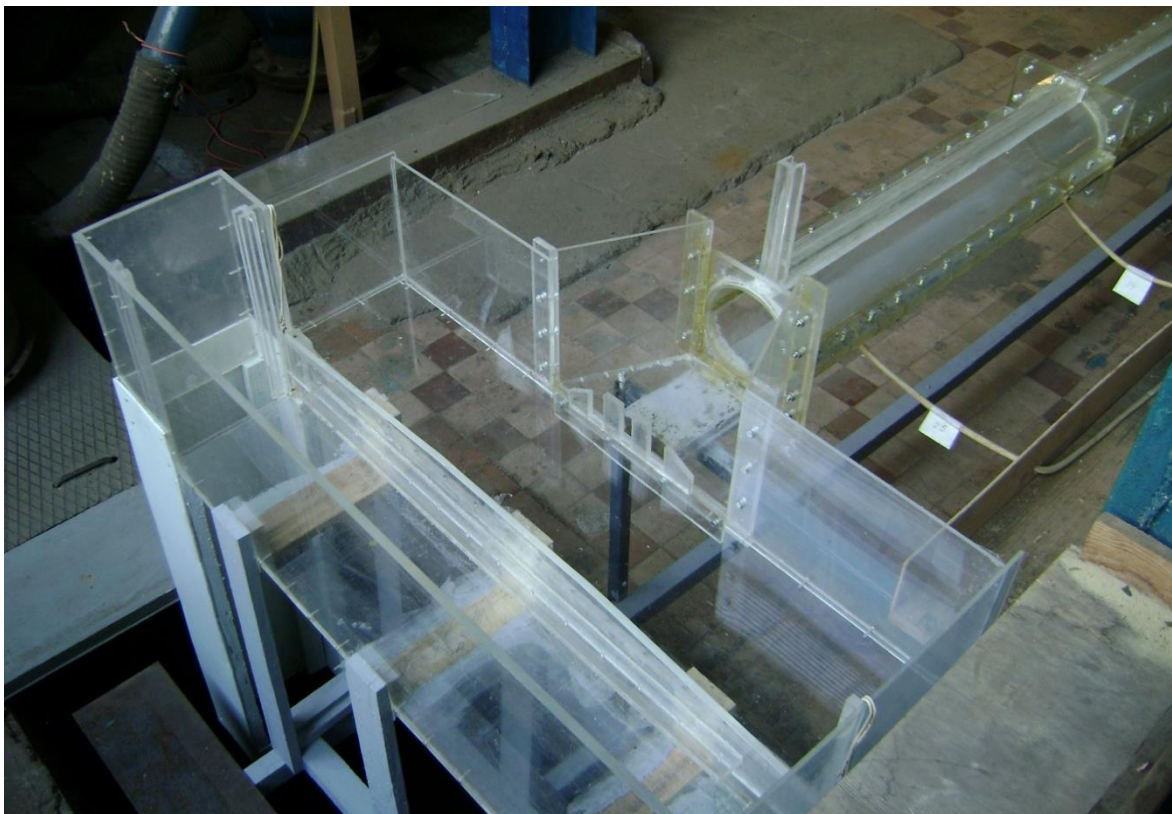


Рисунок 3.5 - Модель сопрягающего участка с прорезной стенкой



Рисунок 3.6 - Общий вид модельной установки (фото)



Рисунок 3.7 - Головной участок и отводящий туннель модели (фото)

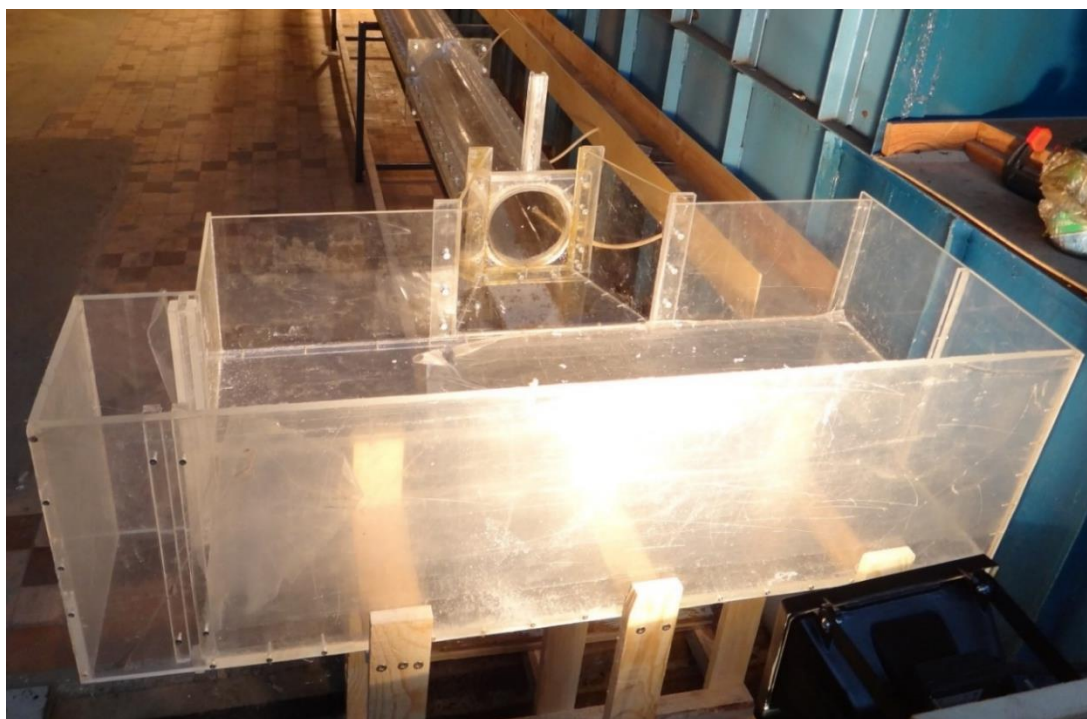


Рисунок 3.8 - Конструкция концевого устройства туннеля (фото)

3.4.3 Конструкции затворных камер

Для определения принципиальной работоспособности разработанного технического решения на первом этапе была принята упрощённая конструкция затворной камеры с круглым отверстием. Принципиальная схема данной конструкции приведена на рисунке 3.9. Фото представлено на рис. 3.10.

Для дальнейших исследований разработана конструкция затворной камеры с двумя затворами с острой кромкой, позволяющая более точно моделировать условия реального сооружения. Фото модели данной конструкции представлено на рисунке 3.11 [3, 4].

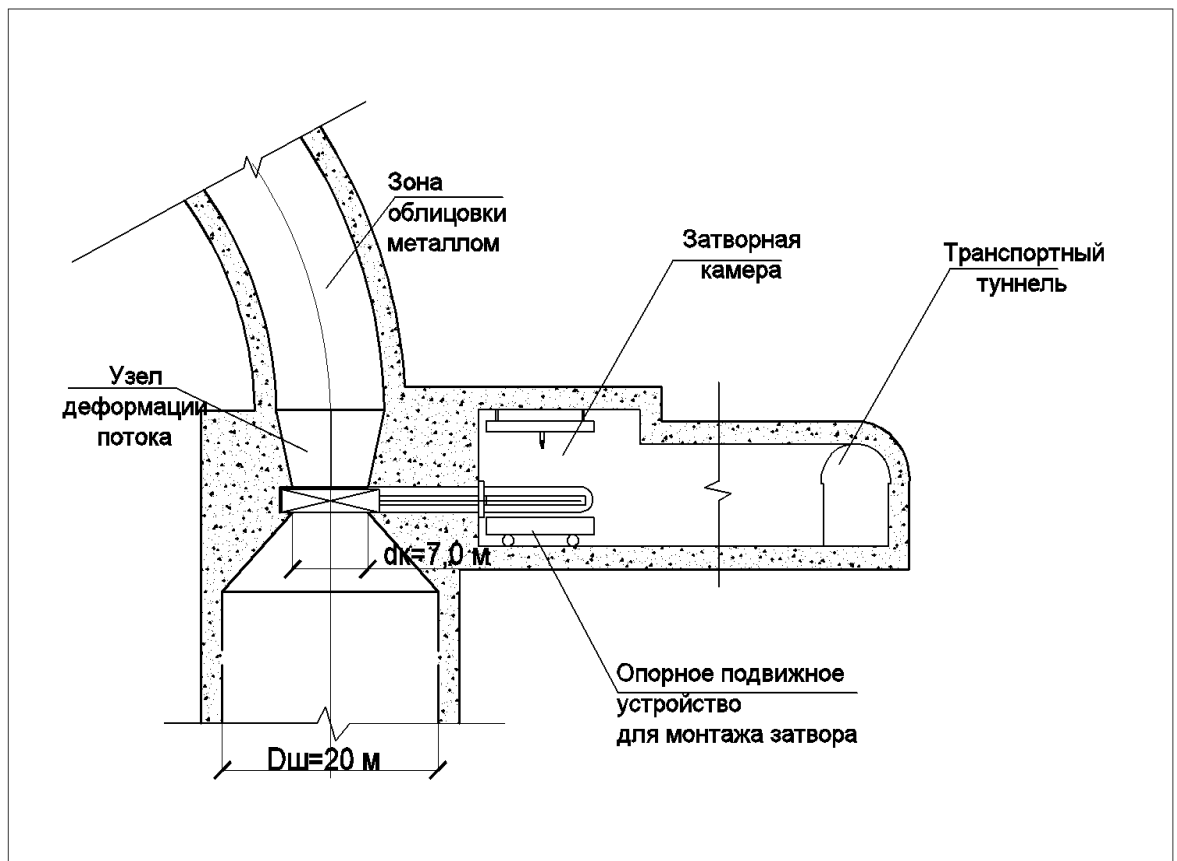


Рисунок 3.9 - Принципиальная схема конструкции горизонтального затвора



Рисунок 3.10 - Фото конструкции затворной камеры с круглым отверстием
($d=5$ см)

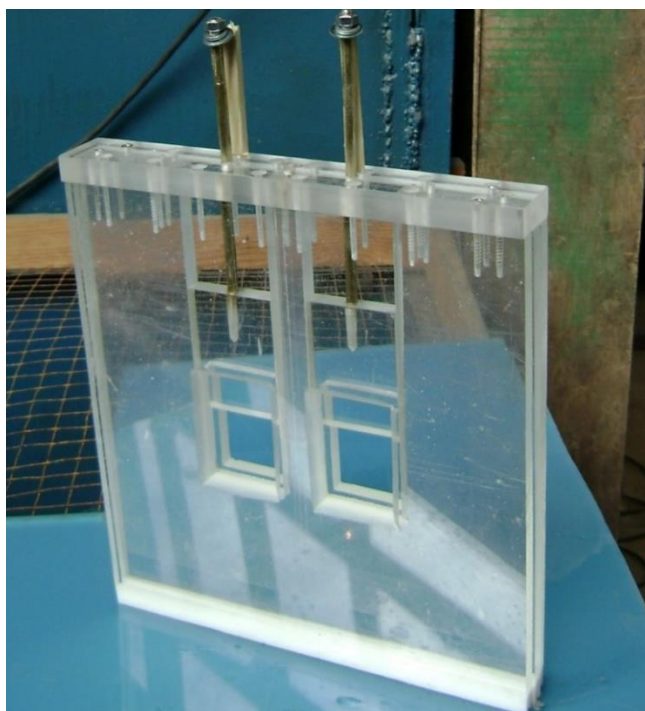


Рисунок 3.11 - Фото конструкции затворной камеры с двумя затворами
(с размерами 6x4 см)

3.5. Средства измерений и пьезометрирования

Для изучения распределения гидродинамического давления по стенкам элементов модели использовалась комплексная пьезометрическая система.

3.5.1. Конструкция пьезометров

Осреднённое гидродинамическое давление измерялось с помощью водяных пьезометров. Конструкция каждого пьезометра включала:

- приёмное отверстие диаметром $d_{\text{отв}}=2$ мм, высверленное в стенке модели;
- штуцер, приклеенный на поверхность оргстекла соосно с приёмным отверстием;
- резиновый шланг с внутренним диаметром 6,0 мм;
- стеклянную пьезометрическую трубку, установленную на щите с миллиметровой шкалой.

Для измерения вакуумметрического давления под затворами на верхнем участке шахты дополнительно установлен пьезометр, подключаемый в период замеров к U-образному стеклянному вакуумметру.

3.5.2. Размещение пьезометров на модели

Схема размещения пьезометров на модели приведена на рисунке 3.12. Общее количество измерительных точек составило 25:

- **На подводящем участке** напорного туннеля (выше створа размещения затворов) — 3 пьезометра.
- **На стволе шахты** (ниже створа размещения затворов) — 7 пьезометров.
- **На отводящем туннеле** — 15 пьезометров.

Фото размещения пьезометров и пьезометрического щита показаны на рис. 3.13-3.15.

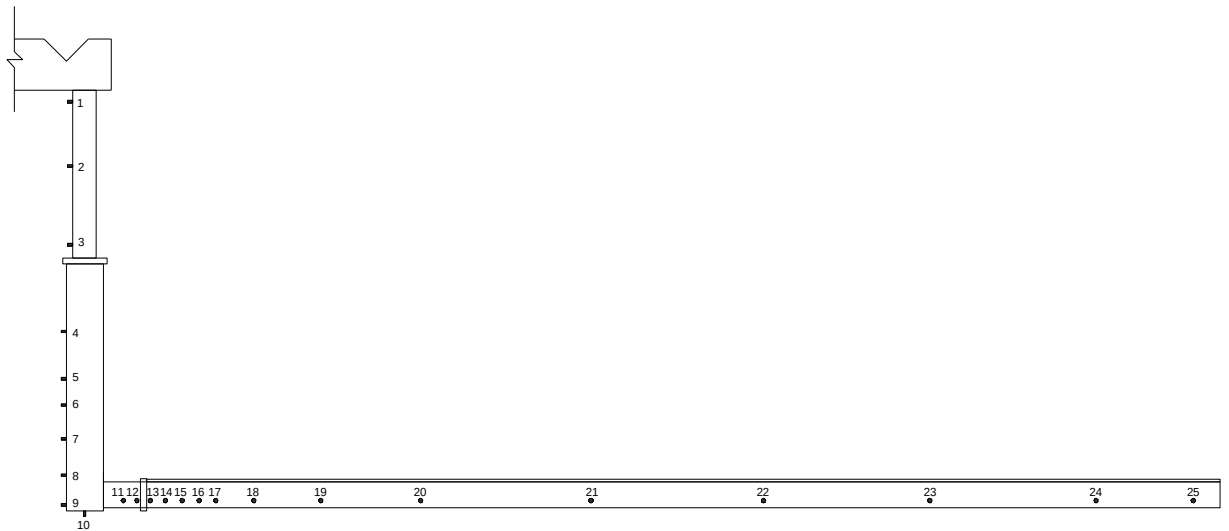


Рисунок 3.12 - Схема размещения пьезометров на модели водосбросного туннеля



Рисунок 3.13 - Пьезометры, установленные на шахте (фото)



Рисунок 3.14 - Размещение пьезометров на отводящем туннеле (фото)



Рисунок 3.15 - Пъезометрический щит с показаниями (фото)

3.6. Методика проведения экспериментов и обработки данных

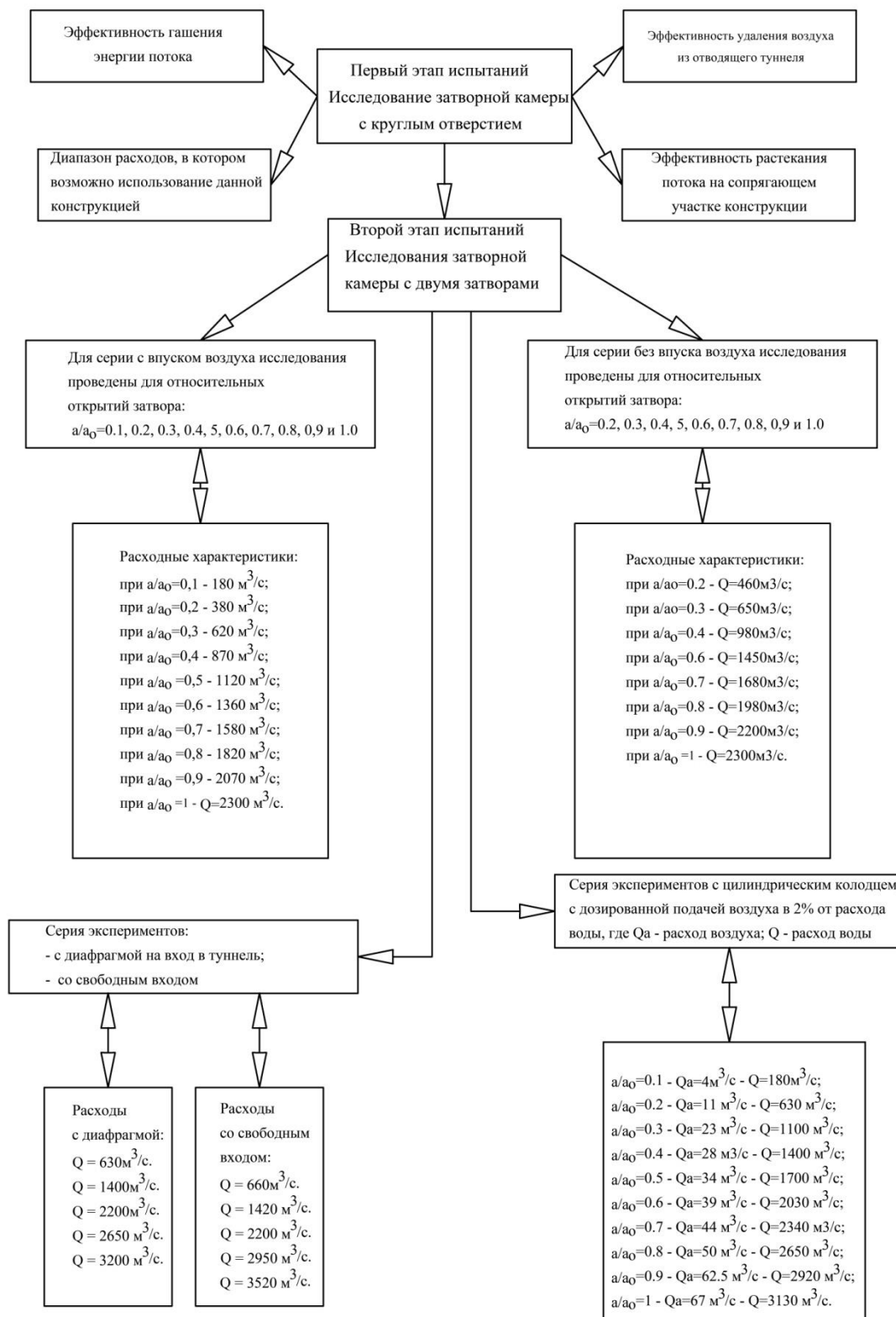
3.6.1. Программа экспериментов

Экспериментальные исследования проводились в несколько этапов:

1. **Калибровочные испытания** — определение фактических расходов воды и воздуха, проверка герметичности системы и работоспособности измерительной аппаратуры.
2. **Основные опыты** — проведение замеров при различных фиксированных расходах воды (Q_w) и расходах воздуха (Q_a) с варьированием степени открытия затворов.
3. **Контрольные опыты** — повторение измерений для оценки воспроизводимости результатов.

Для каждого режимного параметра проводилось не менее трёх независимых измерений с последующим усреднением. Структура многоэтапной программы испытаний представлена в виде блок-схемы, отражающей последовательный переход от подготовительных процедур к основным измерениям.

Блок - схема проведения модельных исследований



3.6.2. Порядок проведения измерений

Измерения выполнялись в следующей последовательности:

1. Установка заданного расхода воды с помощью регулирующей арматуры.
2. Установка заданного расхода воздуха (при проведении опытов с аэрацией).
3. Выдержка режима в течение 3–5 минут для установления стационарного течения.
4. Фиксация показаний всех пьезометров с точностью до 1 мм водяного столба.
5. Фиксация показаний вакуумметра (при необходимости).
6. Визуальная фиксация характера течения (фото- и видеосъёмка).

3.6.3. Обработка экспериментальных данных

Обработка результатов включала следующие этапы:

1. Перевод показаний пьезометров в значения гидродинамического напора H_p (в мм вод. ст.) по формуле:

$$H_p = h_{\text{пьез}} + z, \quad (3.2)$$

где $h_{\text{пьез}}$ — высота столба воды в пьезометрической трубке, мм;

z - геодезическая отметка точки измерения относительно условного нуля, мм.

2. Пересчёт давлений в безразмерные коэффициенты давления C_p :

$$C_p = (p - p_0) / (0.5 \rho v^2), \quad (3.3)$$

где p — локальное давление в точке измерения, Па; p_0 — давление в невозмущённом потоке, Па; ρ — плотность воды, кг/м³; v — характерная скорость потока, м/с.

3. Построение эпюр распределения давления вдоль ствола шахты и отводящего туннеля для каждого исследованного режима.

4. Оценка погрешности измерений в соответствии с ГОСТ 8.207–76.

Конструктивные особенности предложенного технического решения заключаются в следующем:

1. Гашение энергии пропускаемых потоков выполняется в вертикальной шахте, расположенной за камерой размещения ремонтных затворов и шандор.

2. Регулирование расходов выполняется горизонтальными затворами, расположенными в верхней части шахты гашения энергии потока. Горизонтальное размещение затворов позволяет одновременно уменьшить высоту камеры затворов.

3. Отводящий туннель размещается в нижней части шахты гашения энергии потока. При необходимости, шахта гашения энергии потока может быть продлена ниже входного сечения отводящего туннеля.

4. Отводящий туннель выполняется с обратным уклоном

5. Для выпуска воздуха из отводящего туннеля над его шельгой устанавливается воздуховод, который может быть выполнен либо в виде самостоятельного воздуховода, через перфорацию соединённым с туннелем, либо в виде продольной прорези в шельге туннеля.

6. Использование устройства гашения энергии потока в виде круглоцилиндрической шахты позволяет трассировать подводящий и отводящий туннели в любом направлении.

В качестве реализации этой конструкции были рассчитаны параметры регулирующих затворов, шахты гашения энергии потока и отводящего водовода.

В качестве расчётного был принят максимальный расход $Q=1800 \text{ м}^3/\text{с}$, диаметр шахты $D_{\text{ш}}=20.0\text{м}$ и диаметр отводящего туннеля $d_{\text{т}}=14.0 \text{ м}$. Диаметр туннеля 14.0 м обеспечивает максимальную скорость в туннеле $V_{\text{макс}}=11.7\text{м/с}$, что при его работе полным сечением обеспечивает на выходе из туннеля число Фруда:

$$Fr = \frac{V^2}{gd} = \frac{11.7^2}{9.81 \cdot 14} = 0.997 = 1 \quad (3.4)$$

Одной из главных проблем пропуска сбросных расходов Рогунской ГЭС является безопасный выпуск сбросных расходов в русло реки Вахш. Низкая кинетичность потока в выходном сечении предлагаемой конструкции обеспечивает его управляемость [85, 106]. В соответствии с исследованиями растекания потока Г.И. Сухомелом и И.Л. Розовским в работе “О растекании бурного потока” центральный угол β растекания потока на горизонтальной плоскости может быть определён из зависимости:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{1}{\sqrt{\operatorname{Fr}}} = \frac{1}{\sqrt{1}} = 1, \quad (3.5)$$

т.е. обеспечивается свободное растекание потока со средним углом растекания на сторону $\beta/2=22.5^\circ$. При длине площадки растекания 20.0 м ширина потока составит $B=14+2*20*\operatorname{tg}22.5^\circ=30.6$ м. При этом удельный расход составит $q=1800:30.6=58.9$ м³/ м.п.

Для уменьшения величины удельных расходов, выпадающих в русло, можно использовать строительную дорогу вдоль русла как траншейный водовыпуск, устроив вдоль русла распределительную стенку переменной ширины.

3.7. Оценка погрешности эксперимента

Погрешность измерений определялась как сумма систематической и случайной составляющих. Систематическая погрешность пьезометрических измерений оценивалась на основе паспортных данных измерительных приборов (цена деления шкалы — 1 мм, погрешность ротаметров — 1,0 % от измеряемого значения). Случайная погрешность оценивалась по результатам повторных измерений с использованием критерия Стьюдента при доверительной вероятности $P=0,95$. Суммарная относительная погрешность измерения давления не превышала 3,5 % [56, 65, 67].

Выводы по главе

1. Разработана и обоснована методика физического моделирования шахтного гасителя энергии в масштабе 1:100, обеспечивающая соблюдение критерия Фруда и корректный пересчёт результатов на натурные условия.
2. Создана экспериментальная установка, оснащённая системой независимой подачи воздуха и комплексной пьезометрической системой, позволяющей измерять распределение гидродинамического давления в 25 точках модели.
3. Определены программа и порядок проведения экспериментов, обеспечивающие получение воспроизводимых и достоверных данных.
4. Разработан алгоритм обработки экспериментальных данных, включающий перевод показаний в гидродинамические напоры, вычисление безразмерных коэффициентов давления и построение эпюр.
5. Выполнена оценка погрешности измерений, подтверждающая достаточную точность полученных результатов для последующего анализа и пересчёта на натуру.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ДВУХЭТАПНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ШАХТНОГО ГАСИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

4.1. Общая характеристика и программа исследований

Настоящие исследования состояли из двух этапов.

На первом этапе была изучена работа предлагаемого шахтного гасителя с круглой затворной камерой и прямоугольным затвором, которая позволила оценить принципиальную работоспособность конструкции, а именно:

- эффективность гашения энергии потока;
- диапазон расходов, в котором возможно использование данной конструкции;
- эффективность удаления воздуха из отводящего туннеля;
- эффективность растекания потока на сопрягающем участке.

На втором этапе модель была перестроена. Вместо круглой затворной камеры была установлена затворная камера с двумя затворами прямоугольной формы. Сопрягающий участок был оборудован в створе выходного сечения участка предварительного расширения прорезной стенкой.

Программа исследований включала три серии экспериментов:

1. Режим со свободным доступом воздуха в шахту.
2. Режим без доступа воздуха в шахту (вакуумный режим).
3. Режим с дозированной подачей воздуха в шахту в количестве около 2% от расхода водосброса, что соответствует возможному количеству его выделения из воды.

4.2. Первый этап исследований — тестовые испытания модели

На фото рис. 4.1–4.4 показана работа шахтного гасителя при пропуске расхода $Q=200\dots2500\text{ м}^3/\text{с}$. Как видно по этим фото, в туннеле отсутствуют воздушные мешки. На выходе из туннеля формируется кривая спада, а на

сопрягающем участке происходит достаточно интенсивное растекание потока. Однако в створе условной береговой линии можно отметить достаточно неравномерное распределение удельных расходов.



Рисунок 4.1 - Фрагмент шахты в зоне затворной камеры при пропуске расхода $2500 \text{ м}^3/\text{с}$

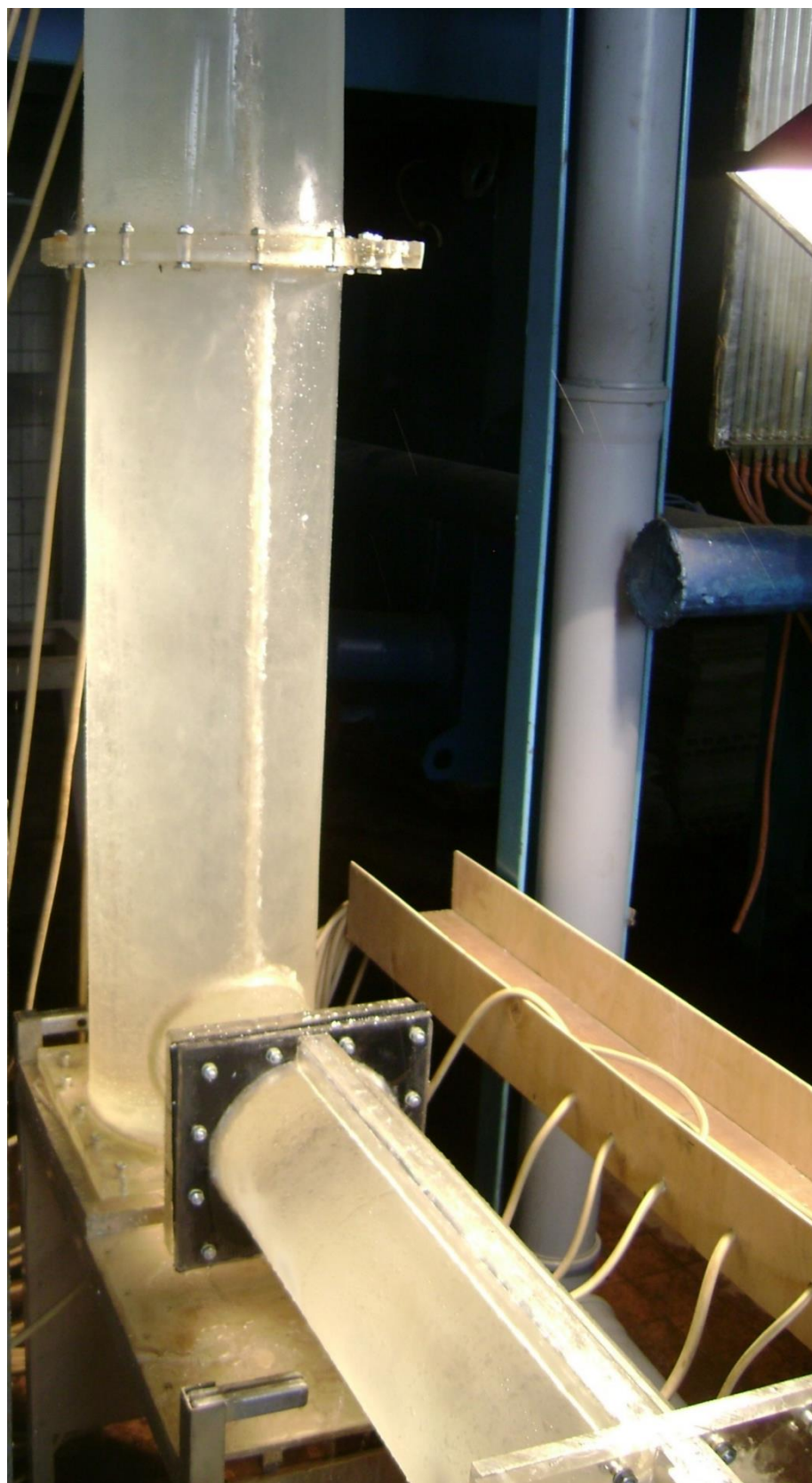


Рисунок 4.2 - Фрагмент примыкания отводящего туннеля к вертикальной шахте при пропуске расхода $2000 \text{ м}^3/\text{с}$

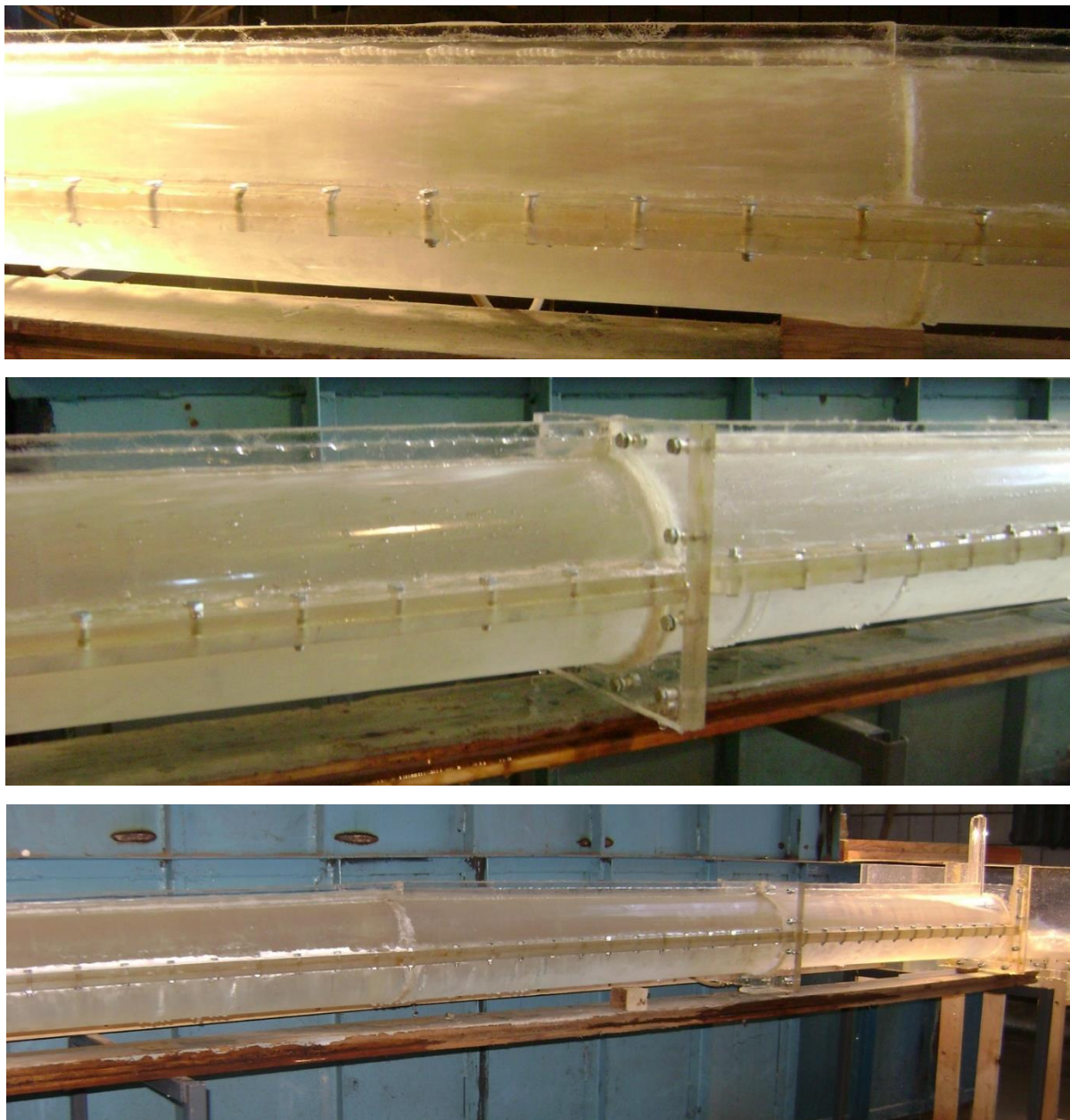


Рисунок 4.3 - Картина движения воды в отводящем туннеле при пропуске расхода $2000 \text{ м}^3/\text{с}$



Рисунок 4.4 - Работа сопрягающего участка с распределительной стенкой при расходе $Q=2000 \text{ м}^3/\text{с}$

На фото рис. 4.5 показаны фрагменты работы воздушной трубы. Как видно по этим фото, в воздушной трубе происходит спокойное движение воздуха, который полностью выделяется из потока.

Исследования работы шахтного гасителя с круглой затворной камерой показали удовлетворительную работу во всём диапазоне расходов, включая форсированные расходы, превосходящие почти в 2 раза расчётный расход $1800 \text{ м}^3/\text{с}$.

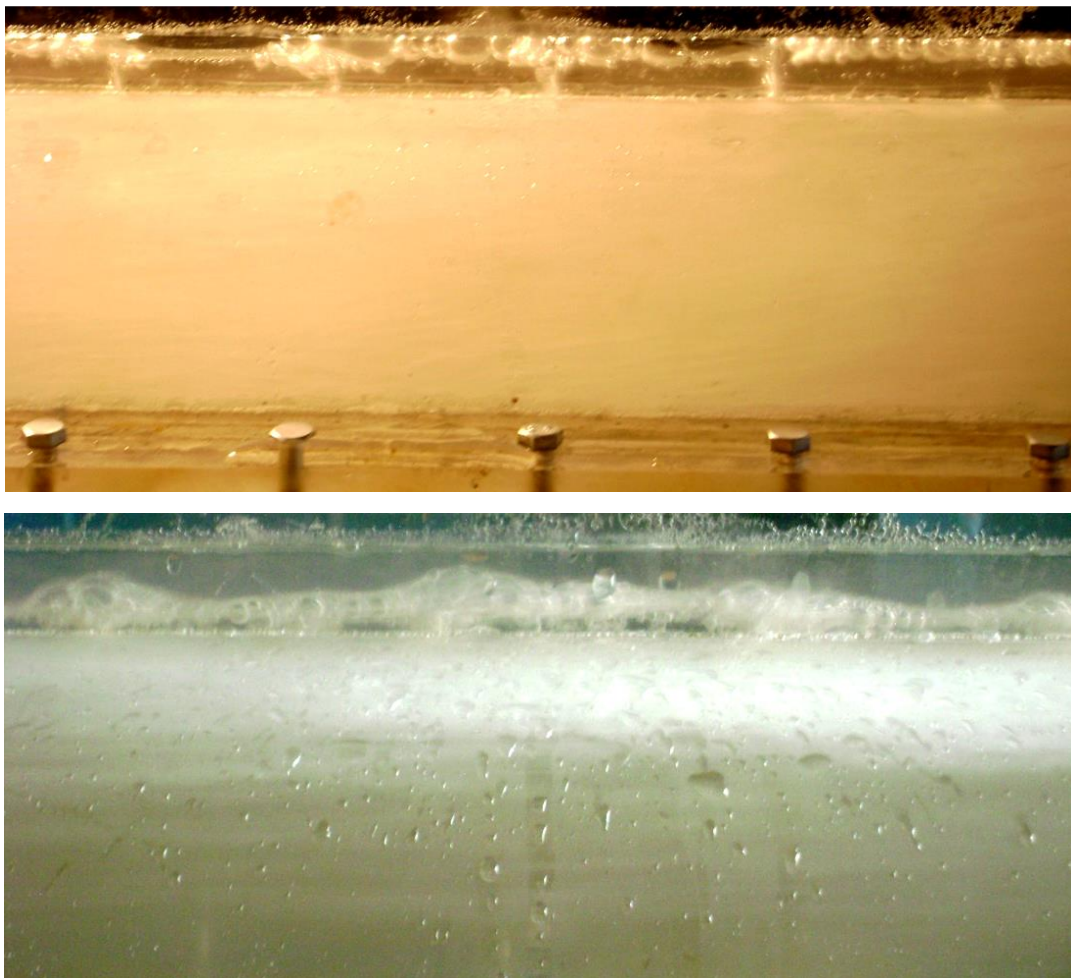


Рисунок 4.5 - Фрагменты работы воздушной трубы

4.3. Второй этап исследований

После проведения тестовых испытаний модель была перестроена. Вместо круглой затворной камеры была установлена затворная камера с двумя затворами прямоугольной формы, фото которой приведено на рисунке 4.6, а сопрягающий участок был оборудован в створе выходного сечения участка предварительного расширения прорезной стенкой. Вид этого варианта конструкции сопрягающего участка приведен на фото рис. 4.6.

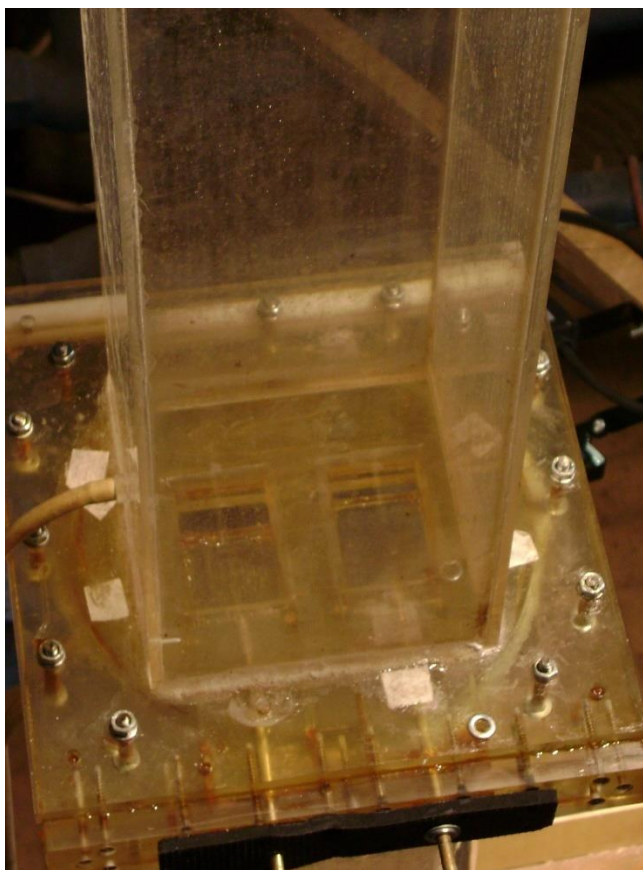


Рисунок 4.6 - Затворная камера с двумя затворами

На рис. 4.7 приведены параметры прорезной стенки, а на рис. 4.8 — параметры распределительной стенки, установленных на сопрягающем участке.

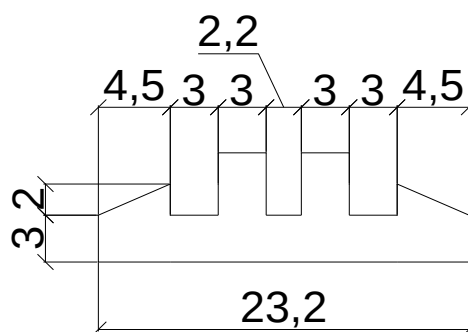


Рисунок 4.7 - Параметры прорезной стенки. Размеры указаны в см

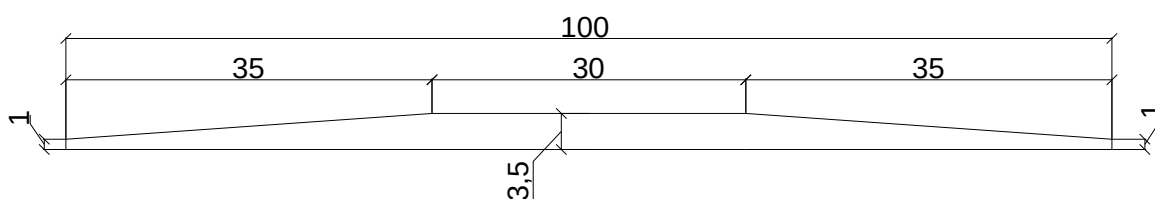


Рисунок 4.8 - Параметры распределительной стенки

4.4 Работа шахтного гасителя при маневрировании затворами

На рис. 4.9–4.11 приведены фото работы водосброса при полностью открытом левом затворе и впуске воздуха в шахту. Расход в этом режиме составил $1400 \text{ м}^3/\text{с}$.



Рисунок 4.9 - Левый затвор с относительным открытием $a/a_0=1$ и с подачей воздуха. Расход $Q=1400 \text{ м}^3/\text{с}$

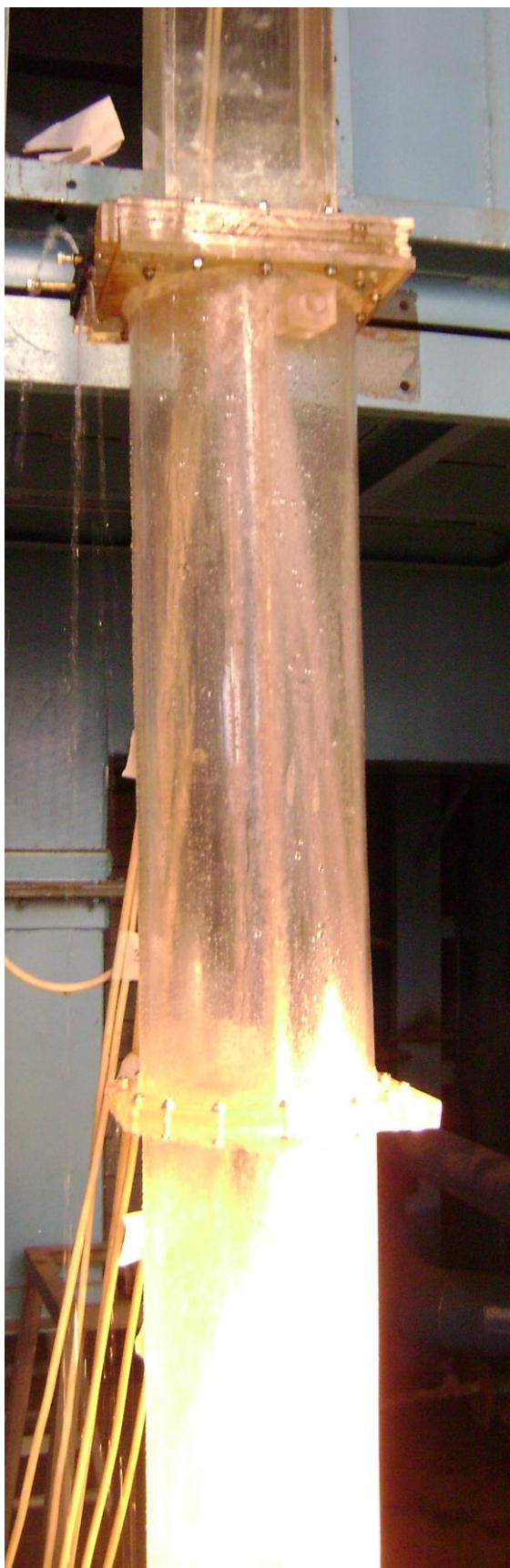


Рисунок 4.10 – Левый затвор с относительным открытием $a/a_0=1$ с подачей воздуха. Расход $Q=1400 \text{ м}^3/\text{с}$. Вид потока за затвором

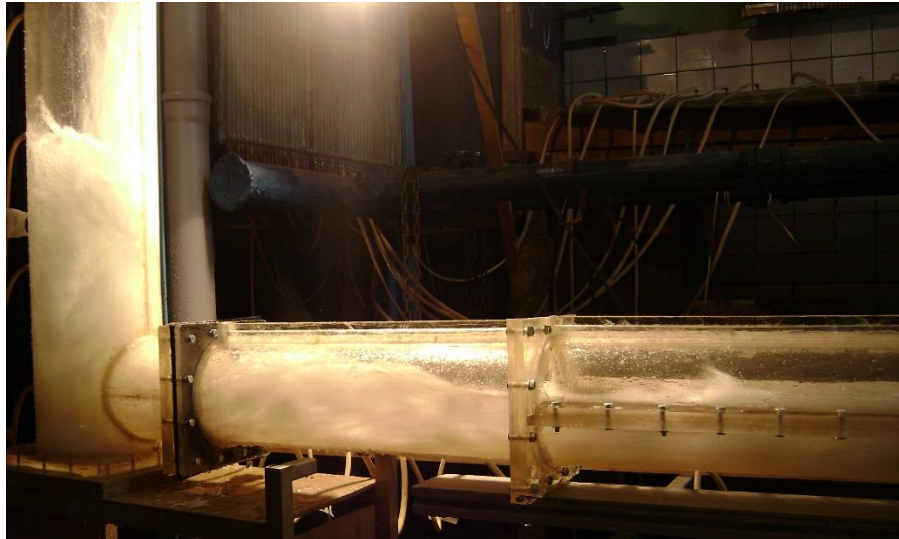
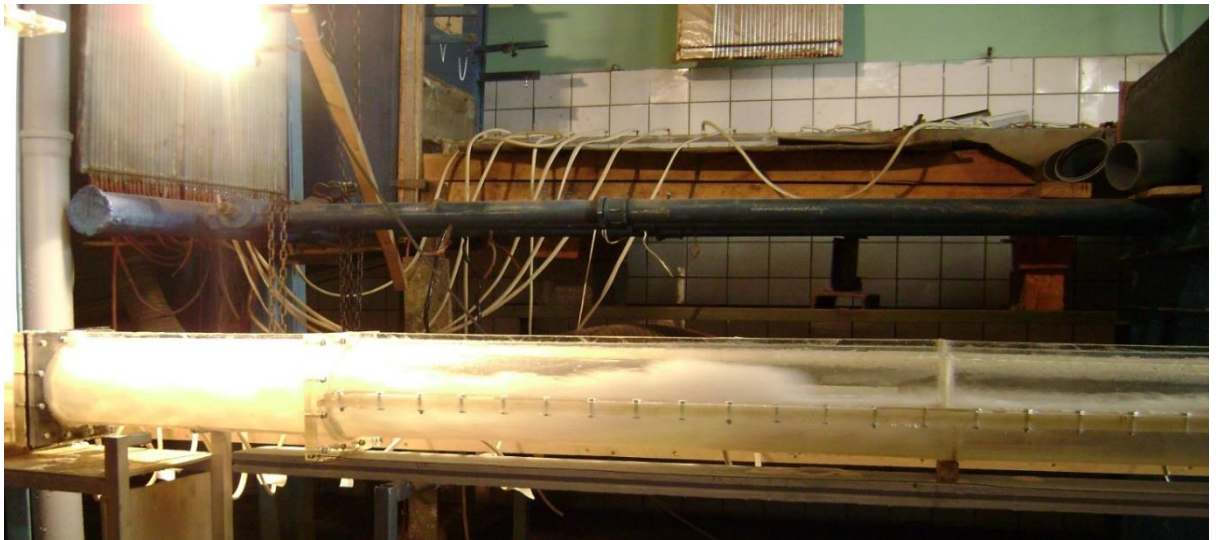


Рисунок 4.11 - Вид потока за диафрагмой на входном участке отводящего туннеля при пропуске расхода $Q=1400 \text{ м}^3/\text{с}$

На рис. 4.12–4.13 приведены фото работы водосброса по всему водопропускному тракту ниже затворной камеры при полностью открытом правом затворе и впуске воздуха в шахту. Расход в этом режиме составил также $1400 \text{ м}^3/\text{с}$.



Рисунок 4.12 - Картина движения потока в вертикальной шахте и на начальном участке отводящего туннеля с относительным открытием правого затвора $a/a_0=1$ и с подачей воздуха за затворной камерой при расходе $Q=1400 \text{ м}^3/\text{с}$



а)



б)



в)

Рисунок 4.13 - Правый затвор с относительным открытием $a/a_0=1$ и с подачей воздуха. Расход $Q=1400 \text{ м}^3/\text{с}$. Картина потока в туннеле:
а) — начальный участок; б) — средний участок; в) — конечный участок

Как видно из приведённых фото, при пропуске расхода $1400 \text{ м}^3/\text{с}$ в отводящем туннеле наблюдается безнапорный режим движения воды. На сопрягающем участке наблюдается интенсивное растекание потока с практически

равномерным выходом его в русло реки. При этом следует отметить, что картина движения воды при работе с полностью открытым левым затвором полностью идентична приведённой, вследствие чего этот режим работы приведён фрагментарно.

На рис. 4.14–4.16 приведены фото работы водосброса по всему водопропускному тракту при двух открытых затворах на 0,5 от полного открытия и впуске воздуха в шахту. Расход в этом режиме составил $1450 \text{ м}^3/\text{с}$.

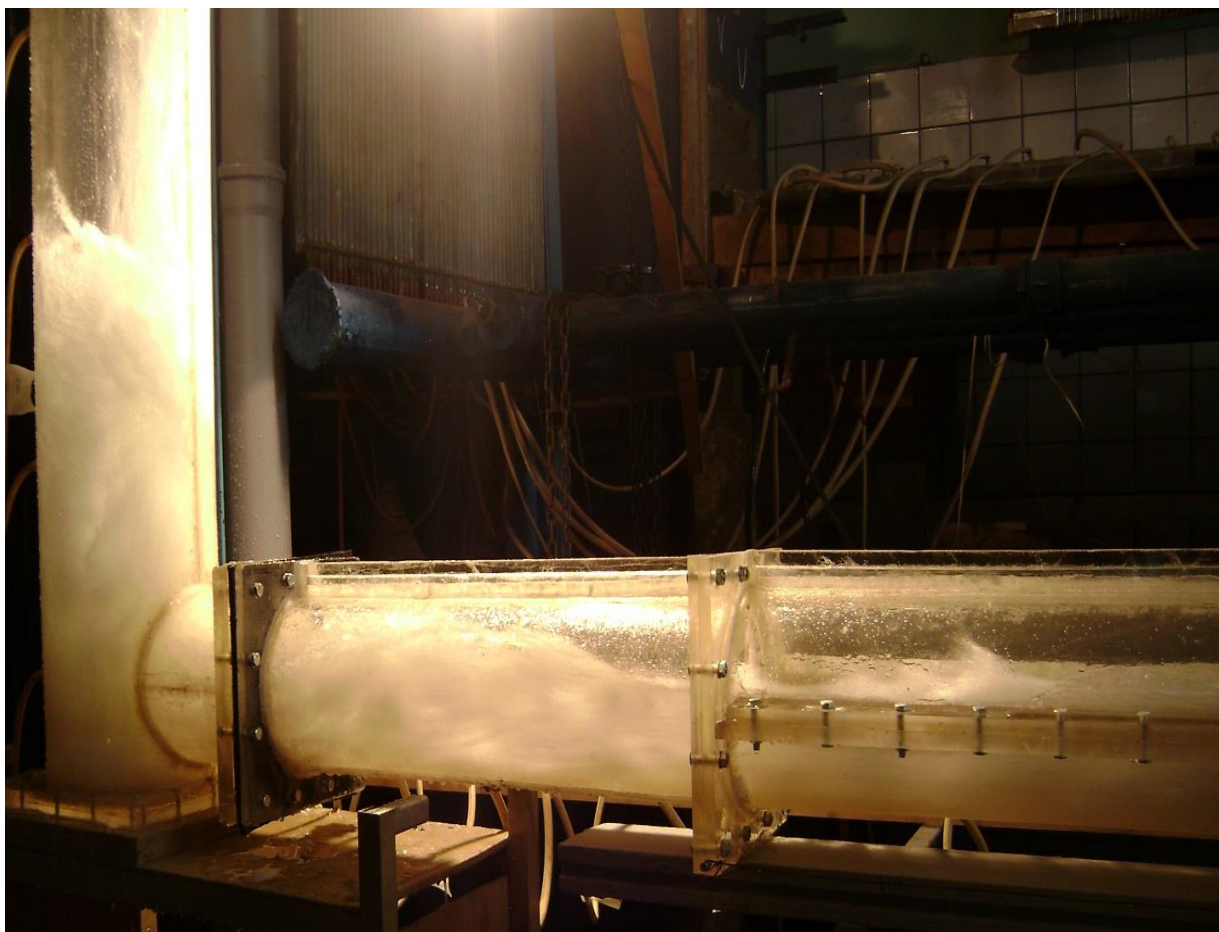


Рисунок 4.14 - Относительное открытие двух затворов $a/a_0=0,5$ с подачей воздуха. Расход $Q=1450 \text{ м}^3/\text{с}$

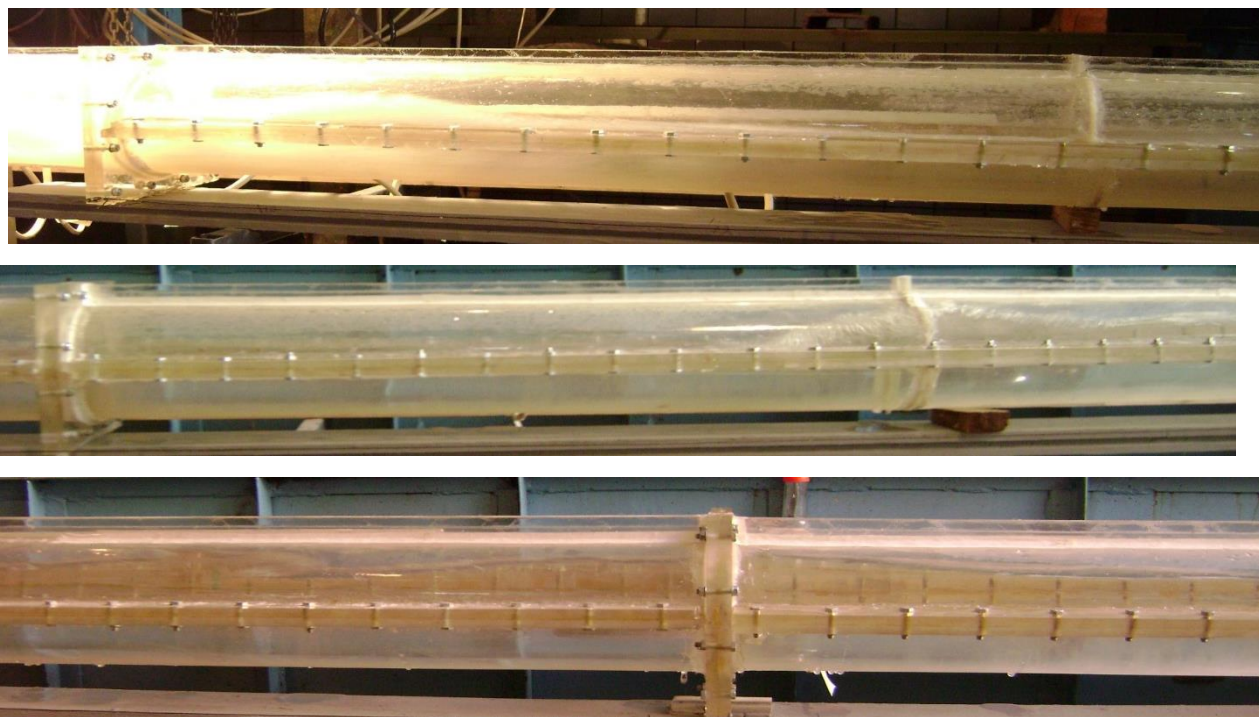


Рисунок 4.15 - Относительное открытие двух затворов $a/a_0=0,5$ с подачей воздуха. Расход $Q=1450 \text{ м}^3/\text{с}$

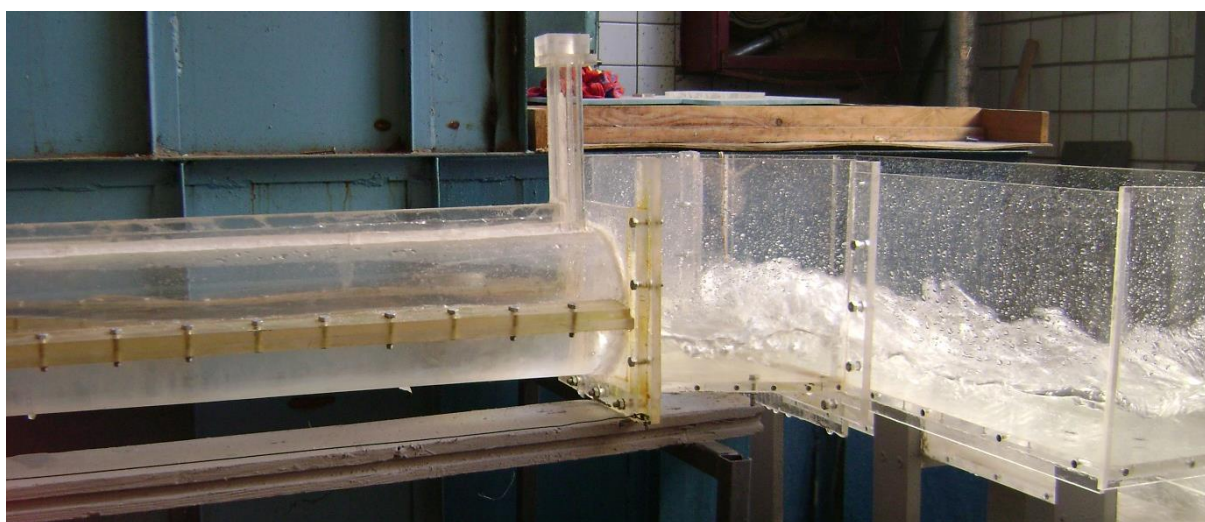


Рисунок 4.16 - Относительное открытие двух затворов $a/a_0=0,5$ с подачей воздуха. Расход $Q=1450 \text{ м}^3/\text{с}$

Как видно по этим фото, работа всего водопропускного тракта удовлетворительная. Следует при этом отметить, что из-за повышенной энергии потока за диафрагмой в туннеле образуется волнистый гидравлический прыжок как при работе с одним открытым затвором, так и с двумя. При этом при расходах $1400...1450 \text{ м}^3/\text{с}$ в сечении с максимальной глубиной волны захлёстывания поперечного сечения туннеля не происходит.

На рисунках 4.17–4.20 приведены фото работы водосброса по всему водопрпускному тракту при открытом левом затворе на 0,5 от полного открытия и впуске воздуха в шахту сразу за затвором. Расход в этом режиме составил 770 м³/с. Как видно на этих фото, по всему водопроводящему тракту картина движения воды удовлетворительная.

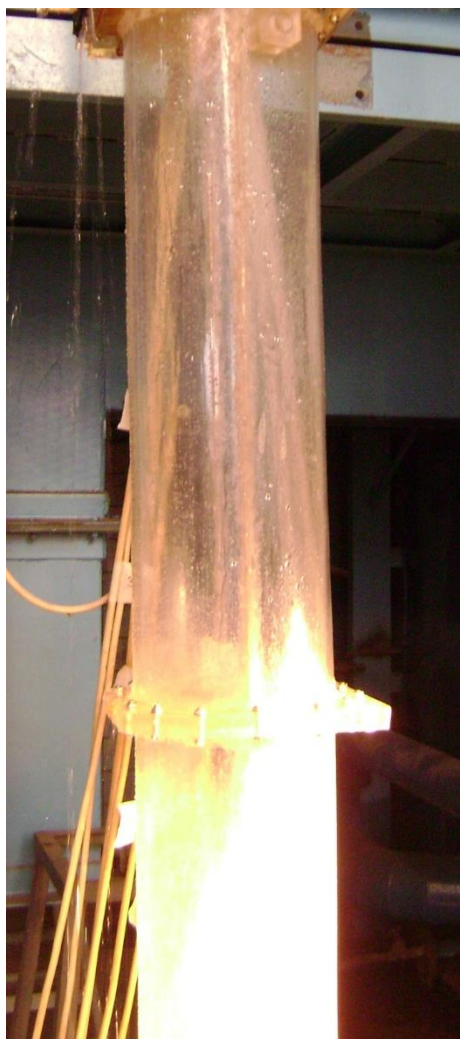


Рисунок 4.17 - Работа левого затвора с относительным открытием $a/a_0=0,5$ и с подачей воздуха. Расход $Q=770$ м³/с. Вид струи за затвором в поперечной плоскости

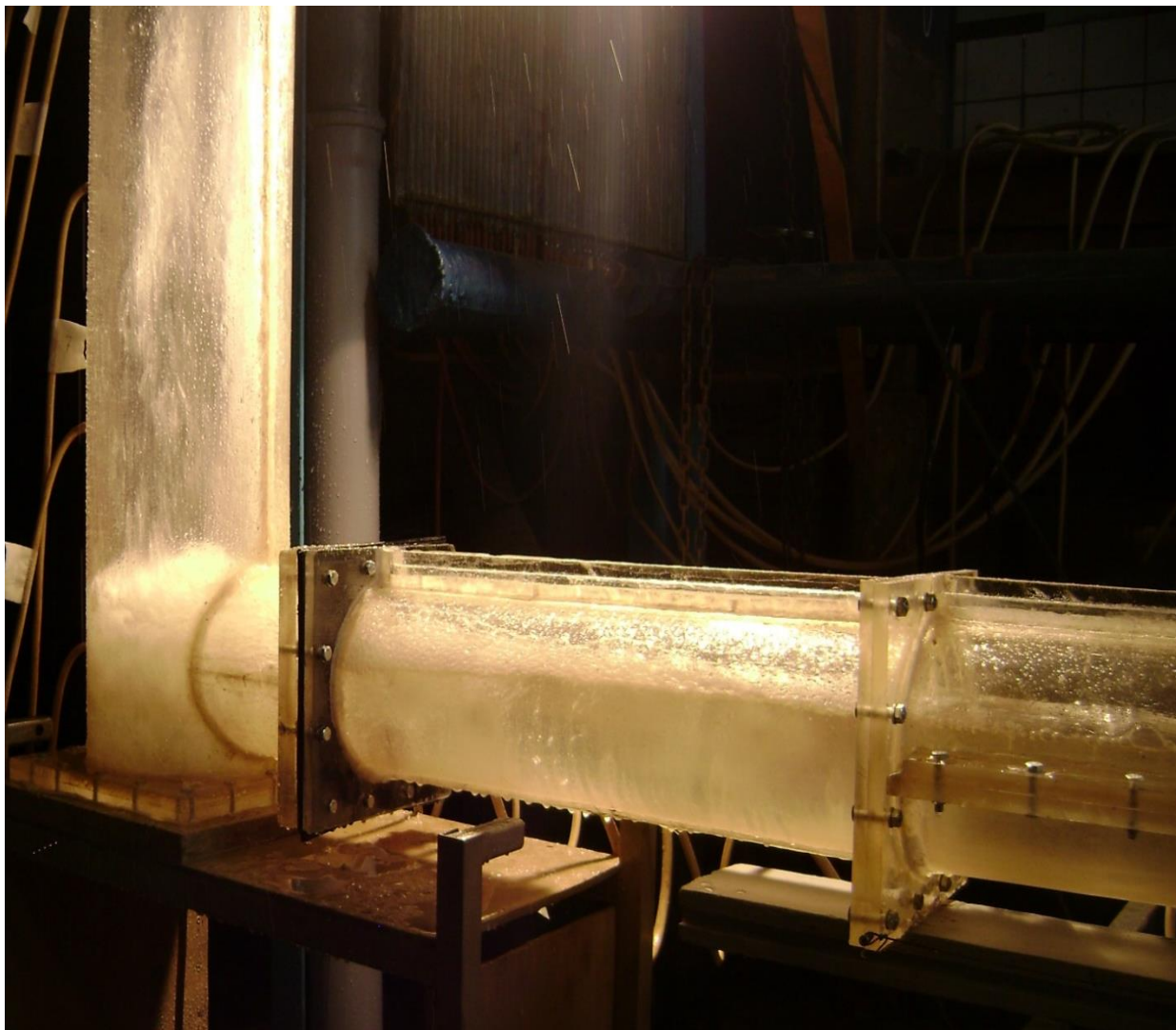
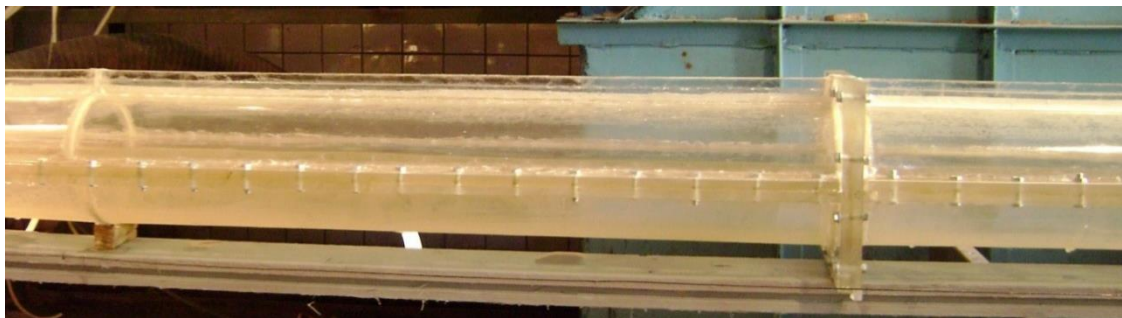
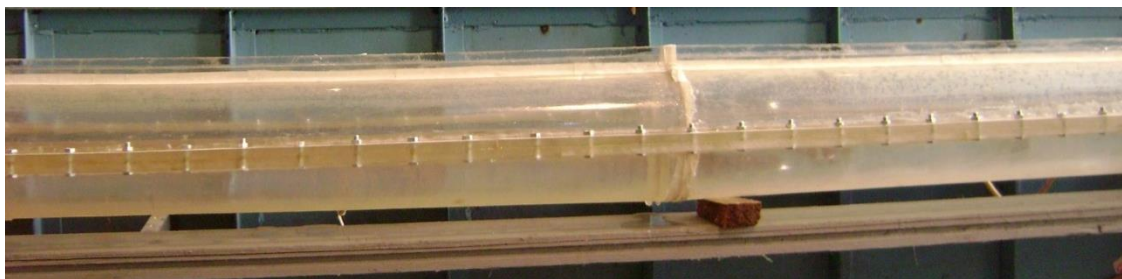


Рисунок 4.18 - Начальный участок туннеля при работе левым затвором с относительным открытием $a/a_0=0,5$ и с подачей воздуха. Расход $Q=770 \text{ м}^3/\text{с}$



а)



б)



в)

Рисунок 4.19 - Картина движения воды в туннеле при работе левым затвором с относительным открытием $a/a_0=0,5$ и с подачей воздуха.

Расход $Q=770 \text{ м}^3/\text{с}$

а) — начальный участок; б) — средний участок; в) — концевой участок



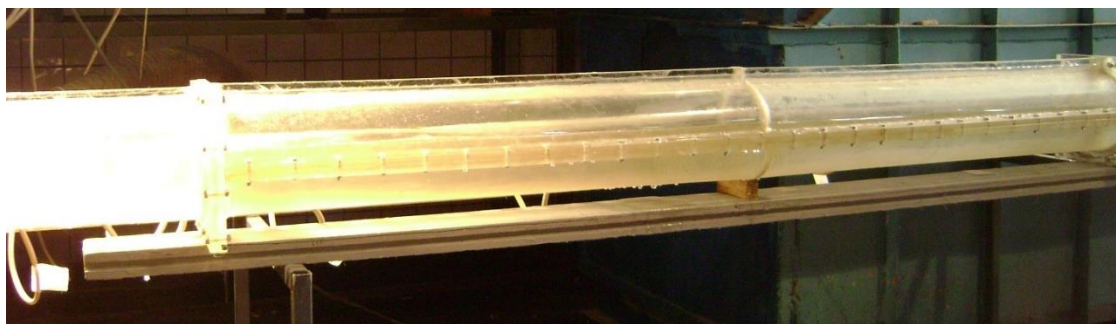
Рисунок 4.20 - Картина движения воды на сопрягающем участке при работе левым затвором с относительным открытием $a/a_0=0,5$ и с подачей воздуха.

Расход $Q=770 \text{ м}^3/\text{с}$

На рис. 4.21 – 4.23 приведены фото работы водосброса по всему водопрпускному тракту при открытом правом затворе на 0,5 от полного открытия и впуске воздуха в шахту. Расход в этом режиме составил 770 м³/с. Как видно по этим фото, по всему водопроводящему тракту картина движения воды, как и при работе левым затвором, удовлетворительная.



Рисунок 4.21 - Правый затвор с относительным открытием $a/a_0=0,5$ и с подачей воздуха. Расход $Q=770$ м³/с. Вид струи за затвором



а)



б)



в)

Рисунок 4.22 - Картина движения воды в туннеле при работе правым затвором с относительным открытием $a/a_0=0,5$ и с подачей воздуха.

Расход $Q=770 \text{ м}^3/\text{с}$

а) — начальный участок; б) — средний участок; в) — концевой участок



Рисунок 4.23 - Картина движения воды в туннеле при работе правым затвором с относительным открытием $a/a_0=0,5$ и с подачей воздуха.

Расход $Q=770 \text{ м}^3/\text{с}$

На рис. 4.24–4.25 приведены фото работы водосброса по всему водопропускному тракту при открытых обоих затворах на 0,25 от полного открытия и впуске воздуха в шахту.

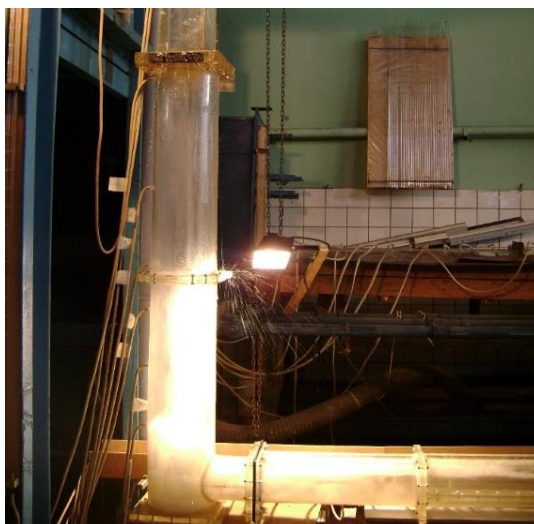
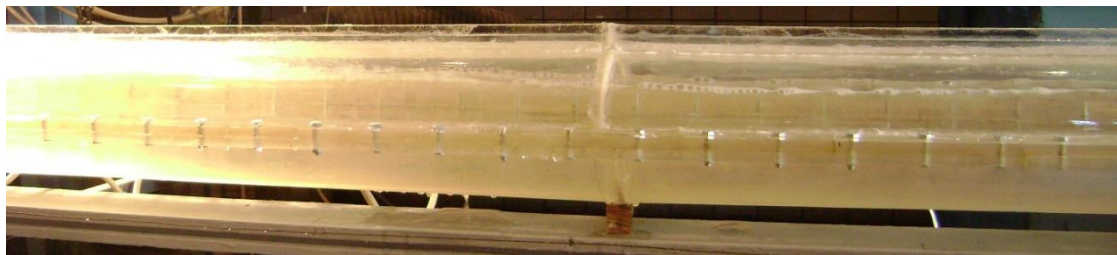
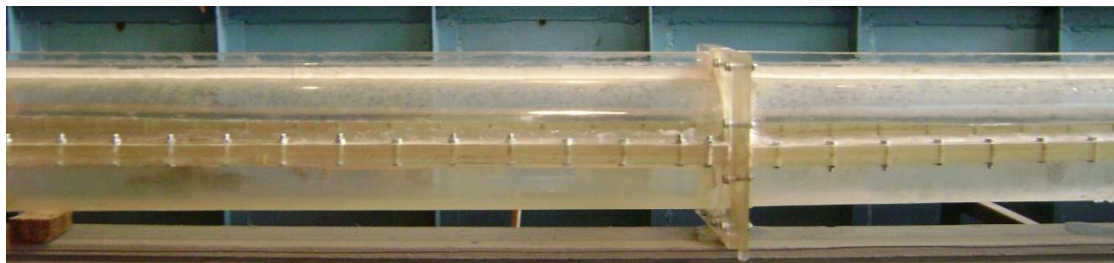


Рисунок 4.24 - Оба затвора с относительным открытием $a/a_0=0,25$ и с подачей воздуха. Расход $Q=800 \text{ м}^3/\text{с}$. Вид струи за затвором

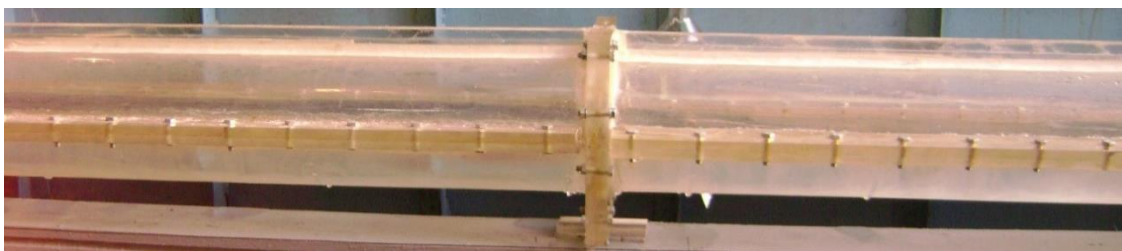
Расход в этом режиме составил $800 \text{ м}^3/\text{с}$. Как видно по этим фото, по всему водопроводящему тракту картина движения воды, как и при работе одним затвором, удовлетворительная.



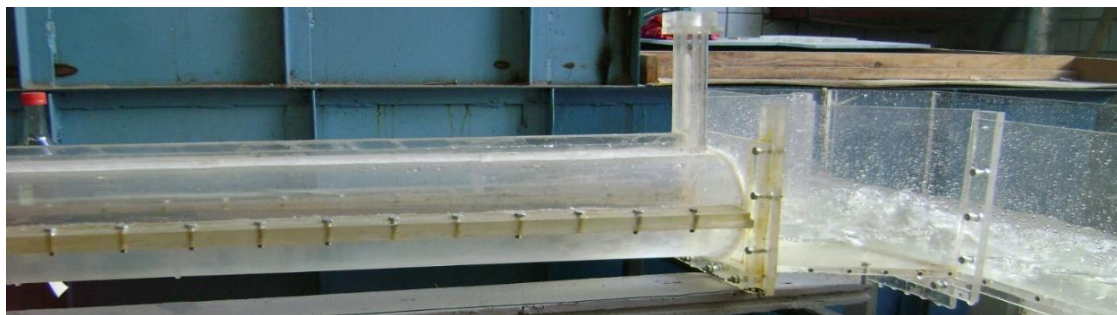
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.25 - Картина движения воды в туннеле при работе двумя затворами с относительным открытием $a/a_0=0,25$ и с подачей воздуха.

расход $Q=800 \text{ м}^3/\text{с}$

а) — начальный участок; б), в) — средние участки; г) — концевой участок

4.5. Уточнение параметров шахтного гасителя энергии

Как показали предварительные исследования работы шахтного гасителя энергии потока, использование затвора с острой кромкой в принятой к исследованиям конструкции затворной камеры при обтекании напорного ребра затвора за счёт искривления поверхности струи происходит её отклонение от вертикального направления падения. В результате этого отклонения поверхность струи входит в контакт с внутренней поверхностью ствола шахты. Сечение контакта струи с поверхностью ствола шахты располагается на расстоянии от плоскости затвора порядка 55 метров при полном открытии затвора, уменьшаясь до 16 метров при относительном открытии $a/a_0=0,25$.

Вследствие получения дополнительной энергии скорость воды может возрастать, что приводит к усилению динамического воздействия на обделку шахты и снижению эффективности гашения энергии.

Для серии с впуском воздуха исследования были проведены для относительных открытий затвора: $a/a_0=0,2;0,3;0,4;0,5;0,9$ и $1,0$.

Для серии без впуска воздуха исследования были проведены для относительных открытий затвора: $a/a_0=0,1;0,2;0,3;0,4;0,5;0,6;0,7;0,8;0,9$ и $1,0$.

На рис. 4.26 представлены расходные характеристики затворной камеры при пропуске расходов с подачей воздуха в шахту гашения энергии и при отсутствии подачи воздуха. Как видно по этим графикам, при полном открытии затворов за счёт выноса воздуха из шахты гашения энергии потока действующий напор на затворах увеличивается, и пропускная способность возрастает на 27% по сравнению с режимом с впуском воздуха за затворами. При этом вакуум достигает на модели величины 100 см, в то время как напор на затворах составляет 149 см. При уменьшении степени открытия затворов пропускная способность затворной камеры без впуска воздуха возрастает по сравнению с режимом с впуском воздуха. Так, при относительной величине открытия затворов $a/a_0=0,5$ эта относительная разница составляет 43%, достигая максимума

50% при относительной величине открытия затворов $a/a_0=0,3$ с последующим снижением до нуля при полном закрытии затворов.

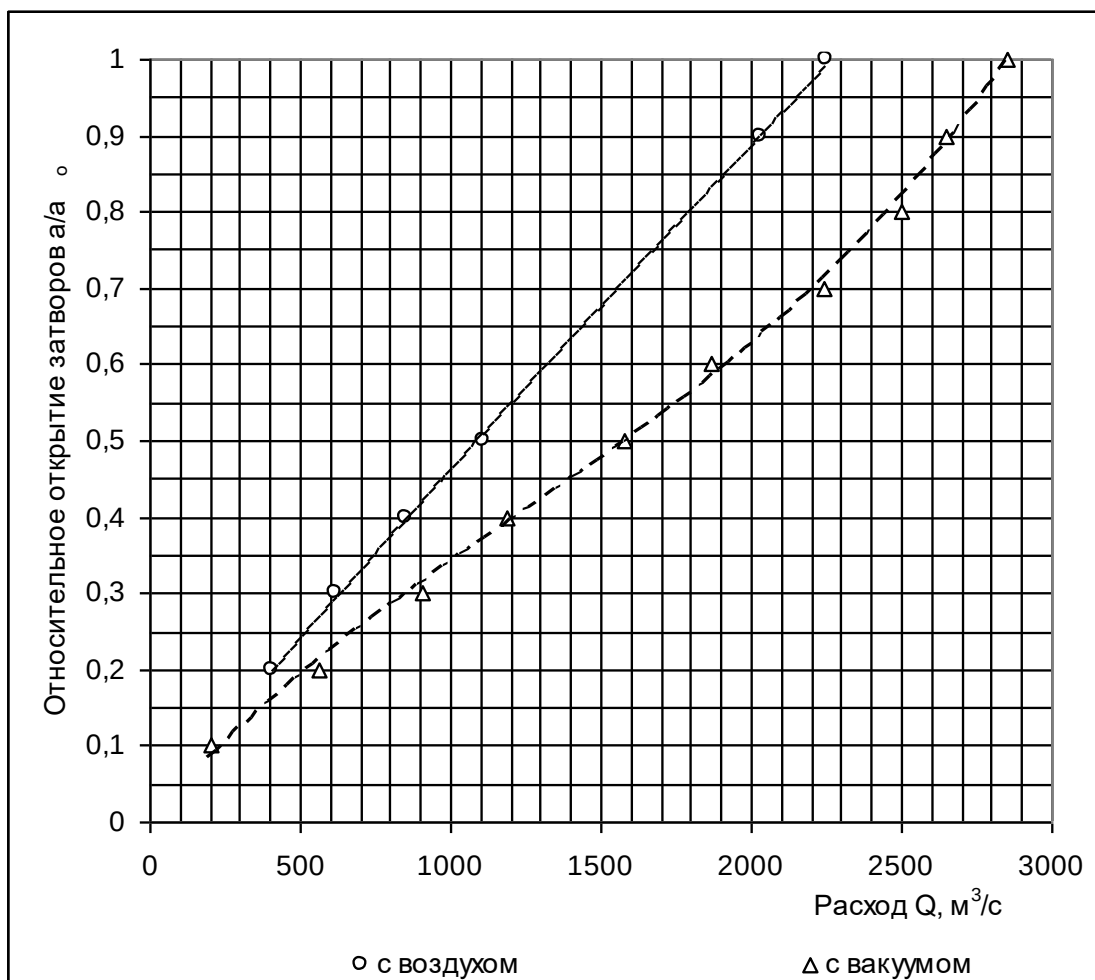


Рисунок 4.26 - Расходные характеристики затворной камеры с затворами со скруглёнными напорными гранями

Режим движения воды в отводящем туннеле существенно зависит от количества воздуха, выносимого из шахты. При отсутствии подачи воздуха в шахту количество выносимого воздуха при установившемся режиме движения воды определяется количеством воздуха, выделяющегося из воды, проходящей через водосбросное сооружение. Это количество воздуха определяется законом Дальтона–Генри [96], согласно которому масса растворённого в воде воздуха пропорциональна парциальному давлению газа на поверхности воды. Если предположить, что в натуральных условиях в шахте сформируется абсолютный вакуум и в процессе движения воды в шахте произойдёт полная её дегазация, то

при этом выделится весь растворённый воздух. Для условий глубинного водозабора с отметок 1135...1150 м температура воды в Рогунском водохранилище будет составлять 6...8 °С, чему соответствует растворение в воде около 2% воздуха по объёму. Для условий Рогунской ГЭС при уровне верхнего бьефа УВБ = НПУ = 1290 м атмосферное давление P_a составит:

$$P_a = 10.33 - \frac{\nabla}{900} + P_{бар} = 10.33 - \frac{1290}{900} + 0.3 = 9.2 \text{ м. вод. ст.} \quad (4.1)$$

На модели максимальный вакуум в шахте гашения энергии достигает 1,4 м вод. ст., или 0,16 от возможного в натурных условиях. В соответствии с законом Дальтона–Генри на модели будет выделяться $0,16 \cdot 2\% = 0,32\%$ расхода воздуха.

В то же время расход воздуха, который может поступить в шахту гашения энергии потока, определяется по зависимости [15, 28, 37, 91]:

$$h_{\text{вак}} = 0,0195 \cdot h_{\text{вак}} = 19,5 h_{\text{вак}} \text{ л/с,}$$

$$Q_a = \mu_{ш} \Omega \sqrt{\frac{\gamma_{\text{в}}}{\gamma_{\text{а}}}} \sqrt{2gh_{\text{вак}}} = 0.62 \frac{\pi \cdot d_{\text{отв}}^2}{4} \sqrt{\frac{1000}{1.28}} \cdot 19.92 \cdot h_{\text{вак}} = 0.0195 \cdot \sqrt{h_{\text{вак}}} \text{ м}^3 / \text{с} = 19.5 \sqrt{h_{\text{вак}}} \text{ л/с}, \quad (4.2)$$

где: $d_{\text{отв}} = 18 \text{ мм} = 0.018 \text{ м}$ – диаметр воздухоподводящего отверстия на модели;

$\mu_{ш} = 0.62$ – коэффициент расхода воздухопропускного отверстия;

$h_{\text{вак}}$, м. вод. ст. – вакуум в шахте гашения энергии на модели при открытом отверстии впуска воздуха;

$\gamma_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды;

$\gamma_{\text{а}} = 1.28 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха.

В процессе экспериментов было установлено, что при свободной подаче воздуха вакуум на модели в шахте гашения энергии достигал $h_{\text{вак}} = 0,3 \text{ м}$ при расходе затворной камеры 22,25 л/с, чему соответствует расчётный расход воздуха $Q_a = 19,5 \cdot 0,3^{1/2} = 11 \text{ л/с}$, что соизмеримо с расходом воды на модели. При попадании в отводящий туннель при этом режиме воздух срывал вакуум за диафрагмой в туннеле и приводил к переходу потока в туннеле из напорного в безнапорный режим с повышенными скоростями движения воды.

В то же время при отсутствии подачи воздуха в шахту гашения энергии потока образующийся на модели вакуум вызывал полное его заполнение

водовоздушной смесью, в результате чего формировался затопленный режим истечения из затворов. В натуральных условиях максимальный подъём уровня воды в шахте гашения энергии потока может быть равен физически возможному вакууму, величина которого вычислена ранее и составляет 9,2 м. При высоте шахты гашения энергии потока порядка 130 м высота свободного падения потока за затворной камерой будет составлять от 30 до 100 м в зависимости от степени открытия затворов. В то же время аэрация потока, поступающего в отводящий туннель, не будет превосходить 2% от расхода воды, что не может вызвать в отводящем туннеле переход режима движения потока из напорного в безнапорный.

По этой причине работа исследуемой конструкции энергогасящего устройства изучалась при двух режимах работы шахты гашения энергии потока: с подачей воздуха и при его отсутствии.

Первый режим соответствует работе шахты со свободным падением воды за затворной камерой, а второму режиму соответствуют реальные гидравлические режимы в отводящем туннеле.

Ниже приведены фото режимов работы модели со свободным доступом воздуха в шахту (при открытиях затворов $a/a_0=0.3$ и $0,8$), и при наличии вакуума, за затворами со скруглёнными напорными гранями. Эксперименты проведены при всех открытиях затвора, $a/a_0=0.1 \dots 1.0$.



Рис. 4.29. Картина движения воды на концевом участке отводящего туннеля при подаче воздуха. $Q=620 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=0.3$

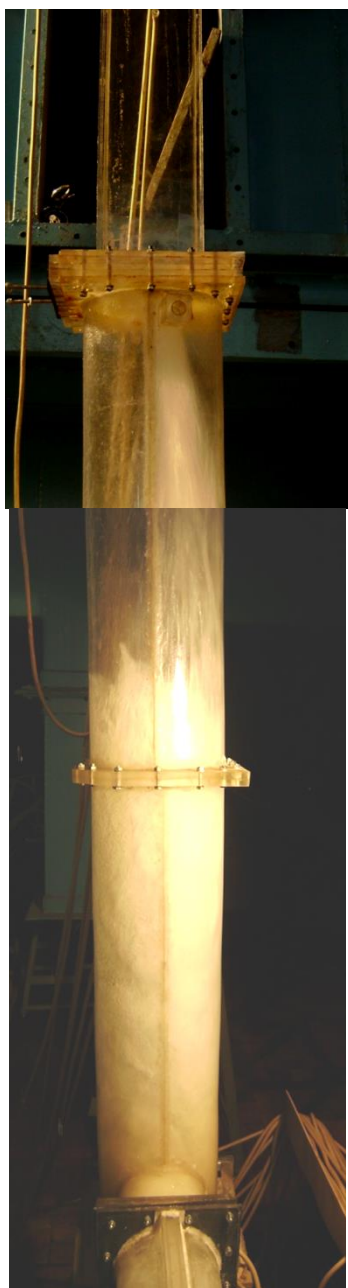


Рис. 4.30.

Картина движения воды
в шахте при подаче
воздуха.

$$Q=1820\text{м}^3/\text{с}, a/a_0=0.8$$

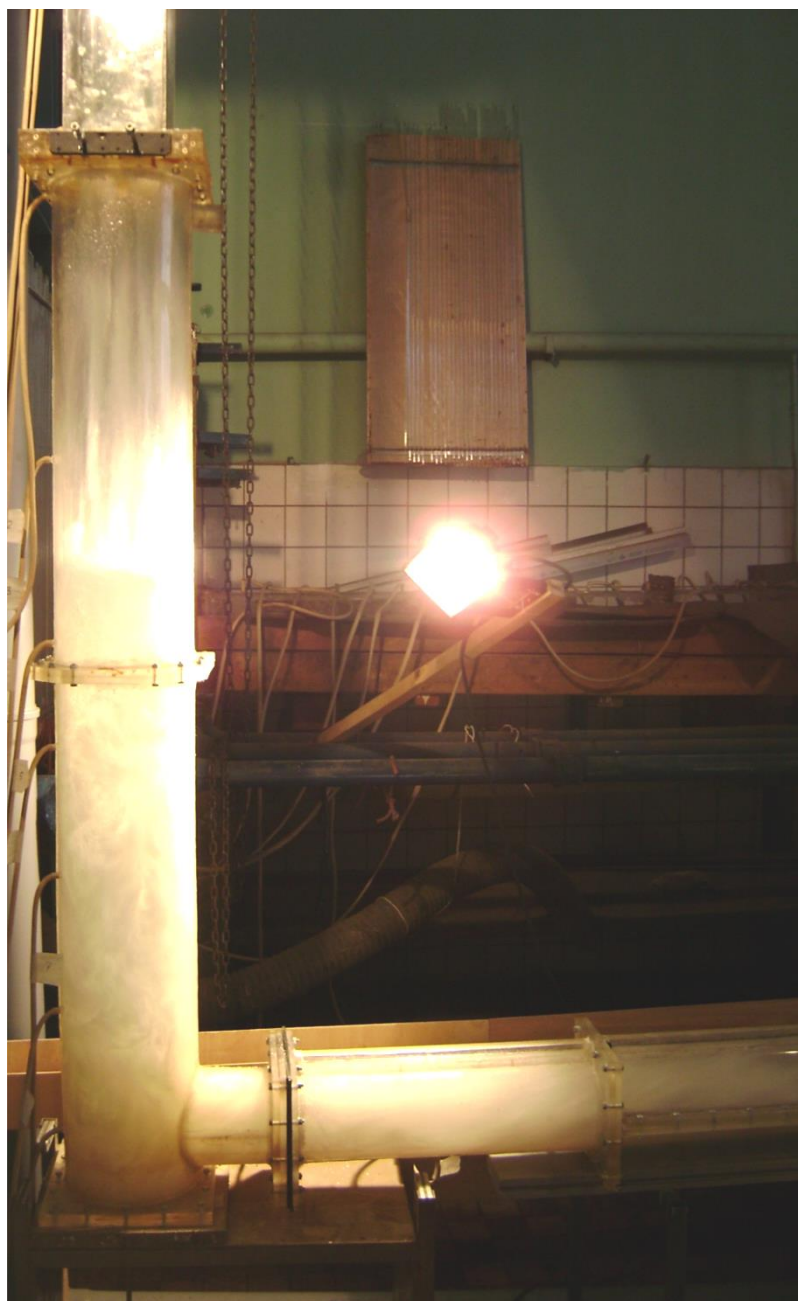


Рис. 4.31.

Картина движения воды в зоне примыкания
отводящего туннеля к шахте при подаче
воздуха.

$$Q=1820\text{м}^3/\text{с}, a/a_0=0.8$$

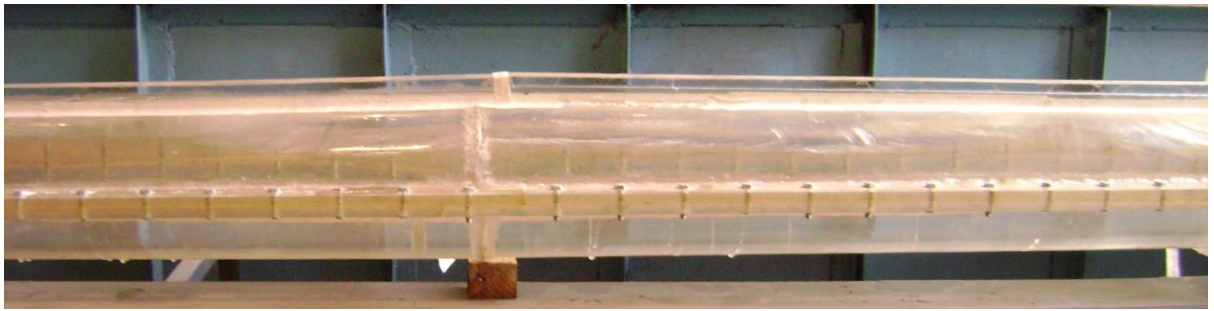


Рис. 4.32. Картина движения воды в отводящем туннеле при подаче воздуха. $Q=1820\text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=0.8$



Рис. 4.33. Картина движения воды на конечном участке отводящего туннеля при подаче воздуха. $Q=1820\text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=0.8$

Анализ приведённых материалов показывает, что в режиме работы с неограниченной подачей воздуха во всём диапазоне возможных расходов водосбросное сооружение работает удовлетворительно.

Изучение работы затворной камеры со скруглённой напорной гранью затворов позволило установить, что растекание потока за затвором улучшилось, но тем не менее в диапазоне открытий затворов $a/a_0=0,3\dots 0,8$ имеется контакт падающих струй с поверхностью стенки шахты. Кроме того, следует отметить наблюдавшийся переход работы прорезной стенки на выходе из туннеля в режим носка-трамплина при пропуске расходов более $1000\text{ м}^3/\text{с}$, что ухудшает условия сопряжения потоков в русле реки Вахш.

Для улучшения картины протекания струй внутри шахты на опорных гранях отверстий затворной камеры и затворов были прикреплены дефлекторы в виде плоских пластин. На затворной камере ширина пластин составляла 2,2 м, а на затворах — 1,2 м.

Ниже на фото рис. 4.34–4.35 приведены результаты исследований характера движения струй за затворами с установкой дефлекторов.

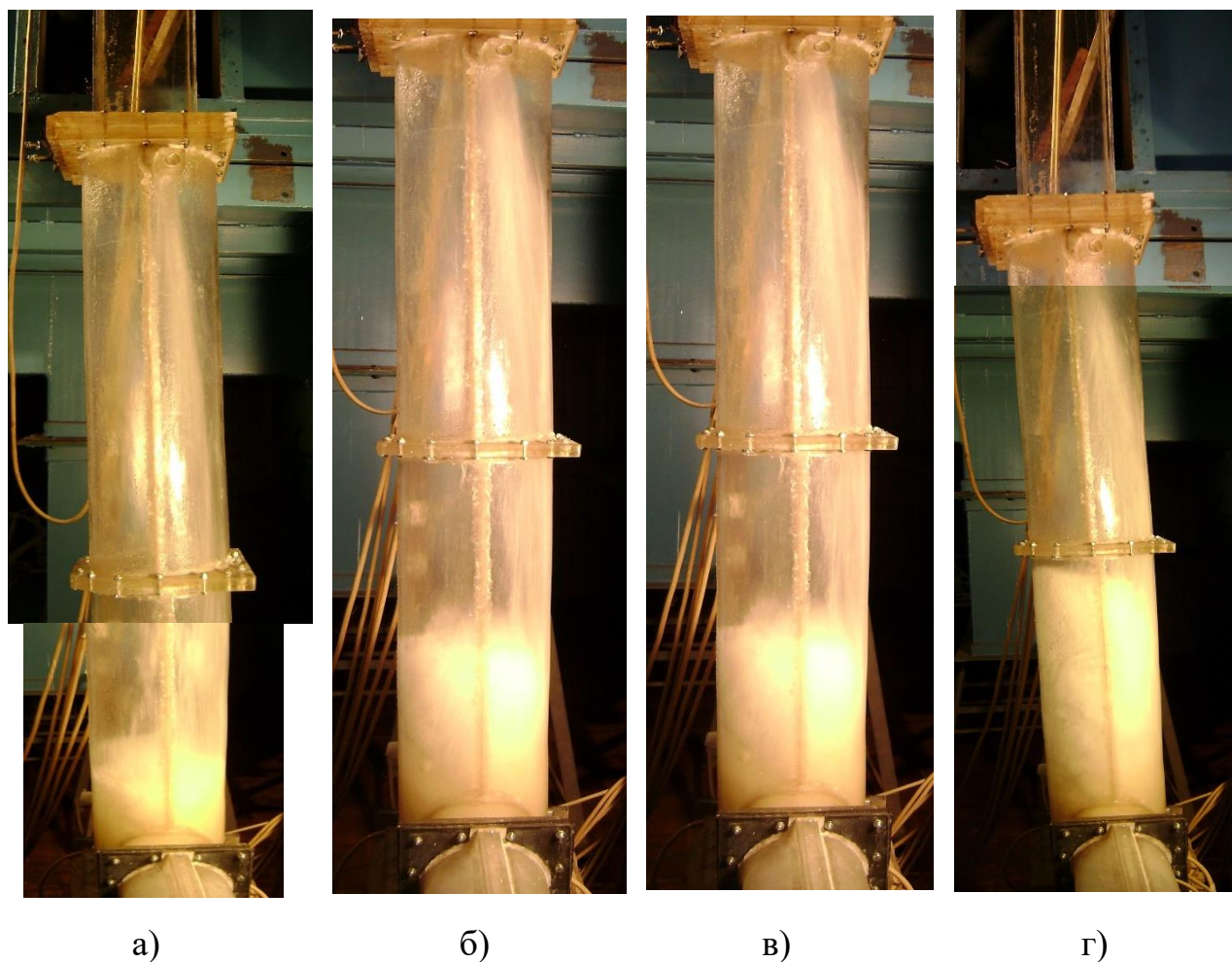
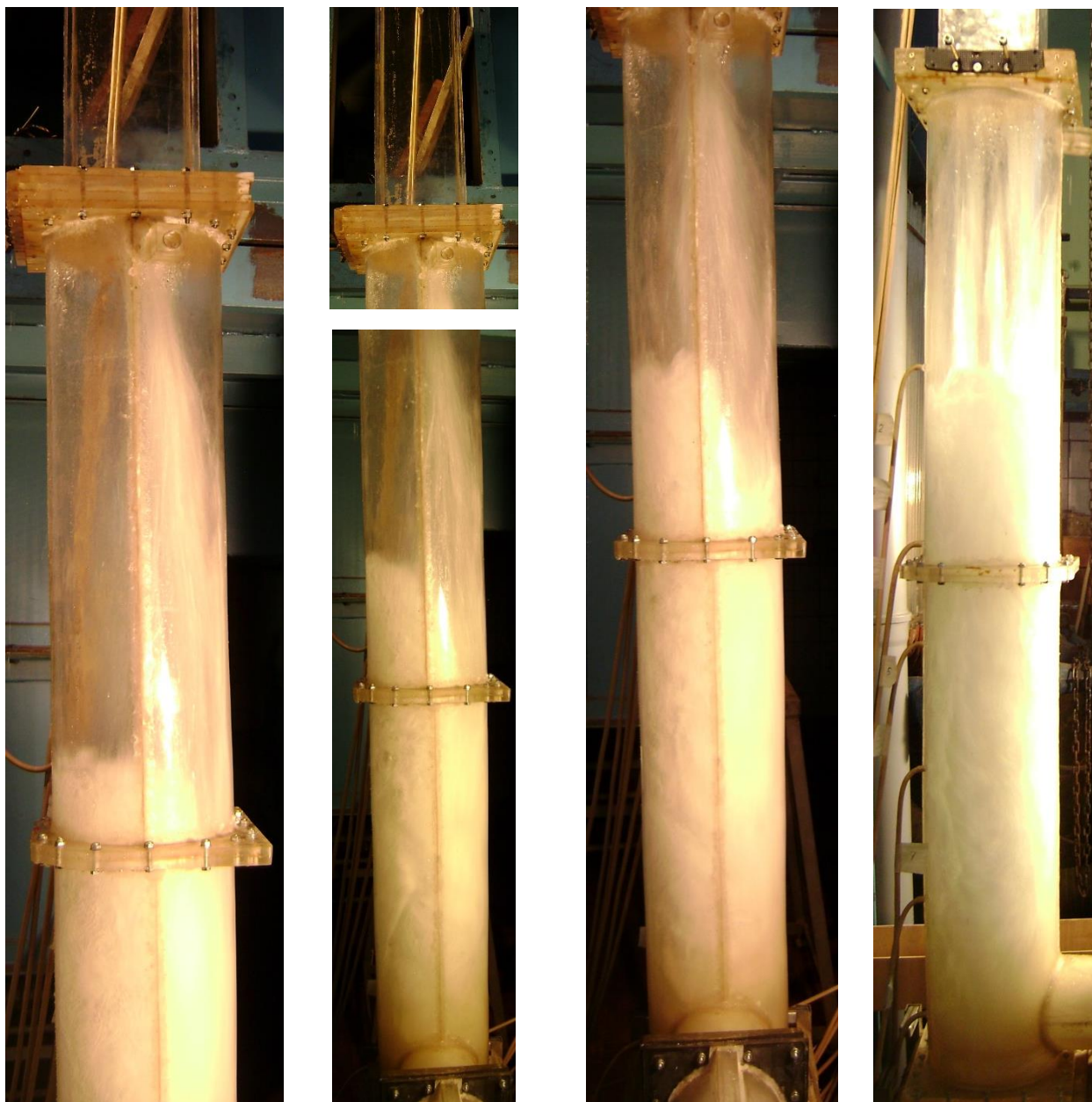


Рисунок 4.34 - Картина движения воды в шахте за затворами с дефлекторами:

- а) - при подаче воздуха, $Q=460 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=0,2$; б) при подаче воздуха, $Q=650 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=0,3$; в) - при подаче воздуха, $Q=980 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=0,4$; г) - при подаче воздуха, $Q=1450 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=0,6$



а)

б)

в)

г)

Рисунок 4.35 - Картина движения воды в шахте за затворами с дефлекторами:

а) - при подаче воздуха, $Q=1680 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=0,7$; б) - при подаче воздуха. $Q=1980 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=0,8$; в) - при подаче воздуха, $Q=2200 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=0,9$; г) - при подаче воздуха $Q=2300 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=1,0$

4.6. Исследование шахты с колодцем

По данным предыдущих исследований установлено, что при размещении узла сопряжения отводящего туннеля с шахтой на низких отметках в непосредственной близости от дна шахты при снижении расходов возникает волновое движение воды в отводящем туннеле, была исследована модель шахты с колодцем, дно которого расположено ниже дна входного сечения туннеля. Причиной этого явления служит рассогласование между напором, необходимым для пропуска пониженных расходов воды, и глубиной воды в шахте, необходимой для гашения увеличивающейся энергии потока [6].

Как было ранее показано, давление потока на дно шахты может быть определено по зависимости [2, 24]:

$$\frac{p_{ш}}{\gamma} = h_{ш} = \frac{4 \cdot \kappa \cdot Q}{\pi \cdot g \cdot d_{ш}^2} \cdot V_c, \quad (4.3)$$

$$V_c \approx 0,8 \cdot \sqrt{2g \cdot (300 - h_{ш})}, \quad (4.4)$$

$$Q \approx 0,8 \cdot 2 \cdot a \cdot b \cdot a \cdot \sqrt{2g \cdot 146} = 2055 \cdot a, \quad (4.5)$$

$$h_{ш} = \frac{4 \cdot 1,5 \cdot 2055 \cdot a \cdot 0,8}{\pi \cdot g \cdot d_{ш}^2} \cdot \sqrt{2g \cdot (300 - h_{ш})} = 3,54 \cdot a \cdot \sqrt{300 - h_{ш}}, \quad (4.6)$$

где $a^- = a/a_0$ — относительное открытие затвора.

Расчётная величина давления потока на дно шахты приведена на рис. 4.36.

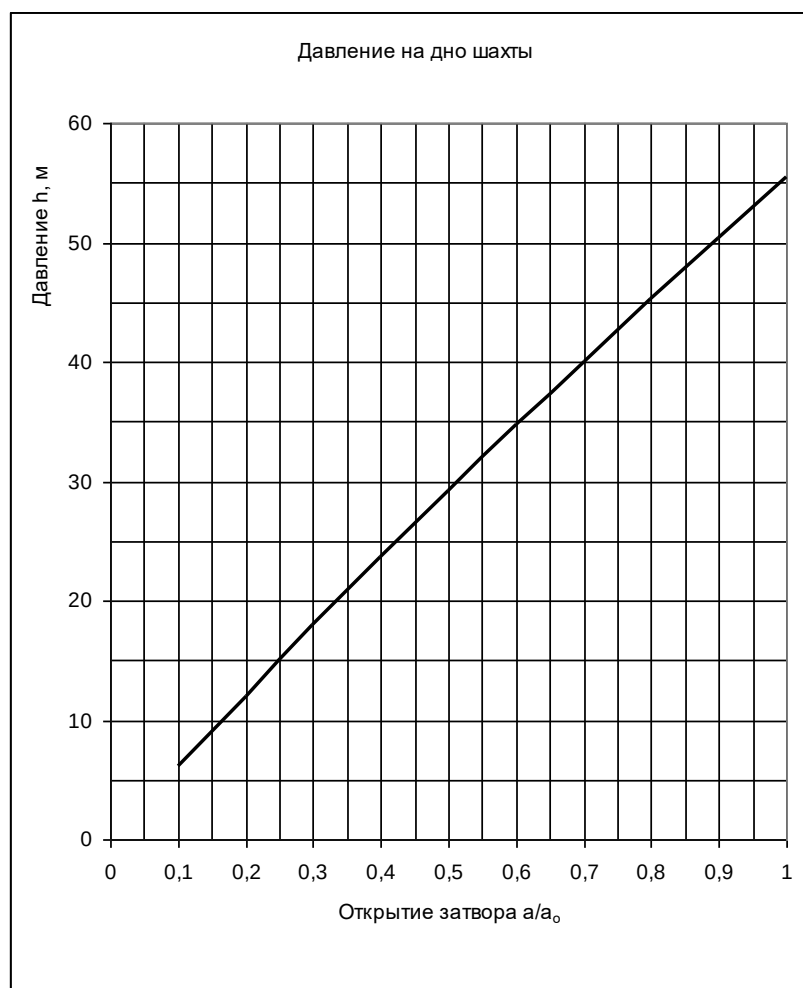


Рисунок 4.36 - Расчётная величина давления потока на дно шахты

В диапазоне открытий затворов $a/a_0=0,5\dots0,2$ фактический напор на входе в туннель для пропуска соответствующих расходов падает, в то время как глубины, формирующиеся на дне шахты вследствие гидродинамического воздействия струй, остаются высокими. Это приводит к тому, что при увеличении глубины в шахте возрастает напор и расход туннеля, приводящий к частичному его опорожнению и увеличению мгновенного расхода туннеля. После этого глубина воды в туннеле снова увеличивается, уменьшая расход в туннеле, что приводит к возникновению в нём волнового характера движения воды.

Учитывая это обстоятельство, была исследована модель шахты с колодцем, расположенным ниже дна входного сечения туннеля на 70м. Фото модели этого варианта водосброса приведена на рис. 4.37.

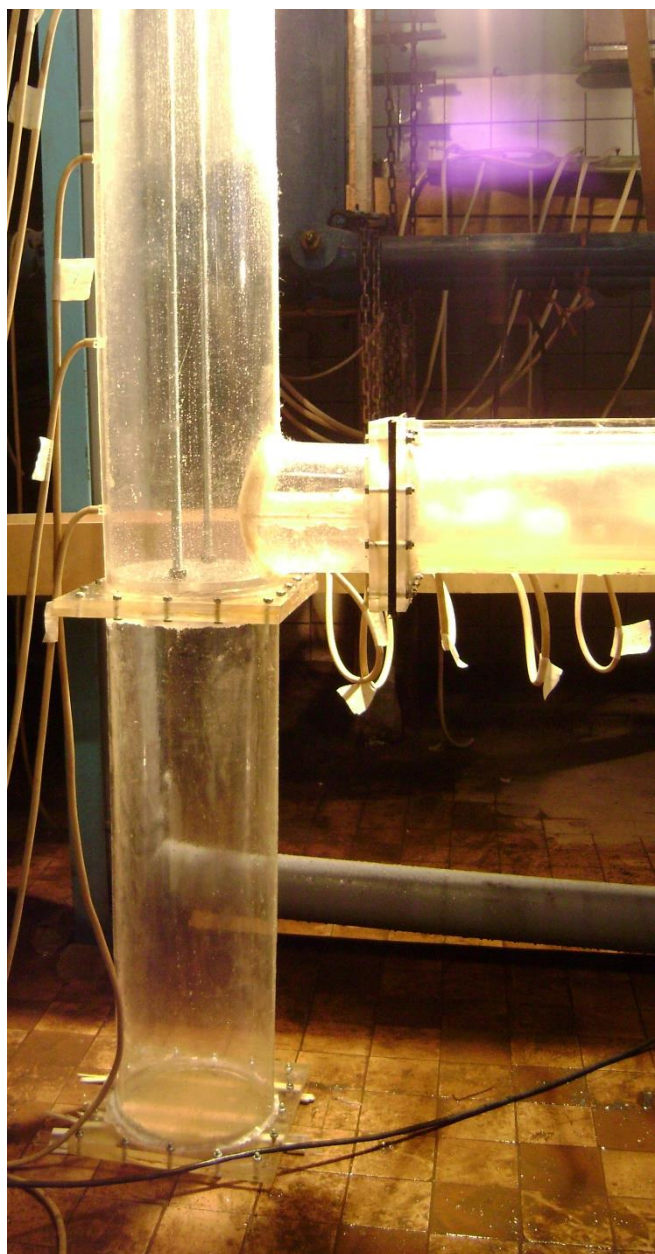


Рисунок 4.37 - Фото шахты с колодцем для гашения энергии

Для этого варианта конструкции шахтного водосброса была проведена серия экспериментов с затворной камерой со скруглёнными гранями и с дефлекторами с подачей воздуха в шахту в количестве около 2% от расхода воздуха в соответствии с теоретическими расчётами, приведёнными выше.

На рис. 4.38–4.48 приведены соответствующие фото картин движения воды для открытых затвора $a/a_0=0.1$, 0.5 и 1.0 при дозированной подаче воздуха в шахту.

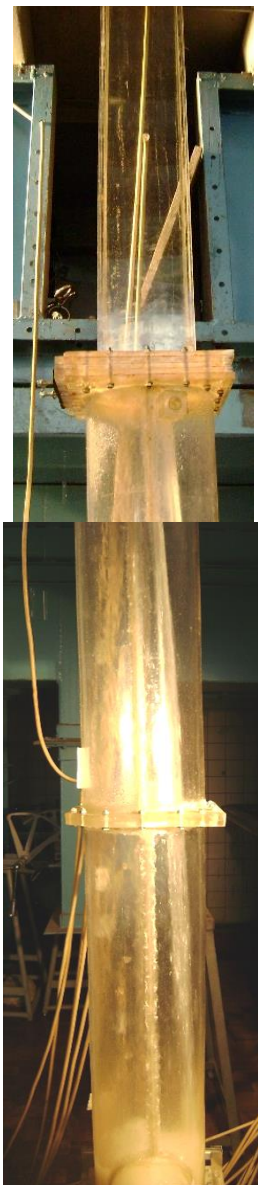


Рисунок 4.38 - Картина движения воды в шахте при подаче воздуха $Q_a = 4 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q=180 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=0,1$



Рисунок 4.39 - Картина движения воды в зоне примыкания отводящего туннеля к шахте при подаче воздуха $Q_a=4 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q=180 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=0,1$

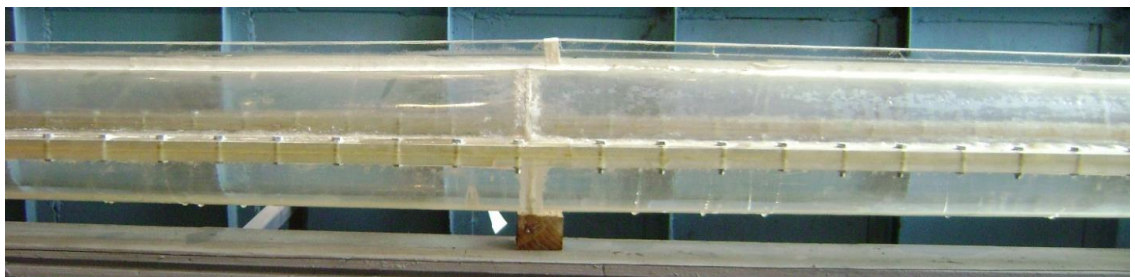


Рисунок 4.40 - Картина движения воды в отводящем туннеле при подаче воздуха $Q_a=4 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q=180 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=0,1$

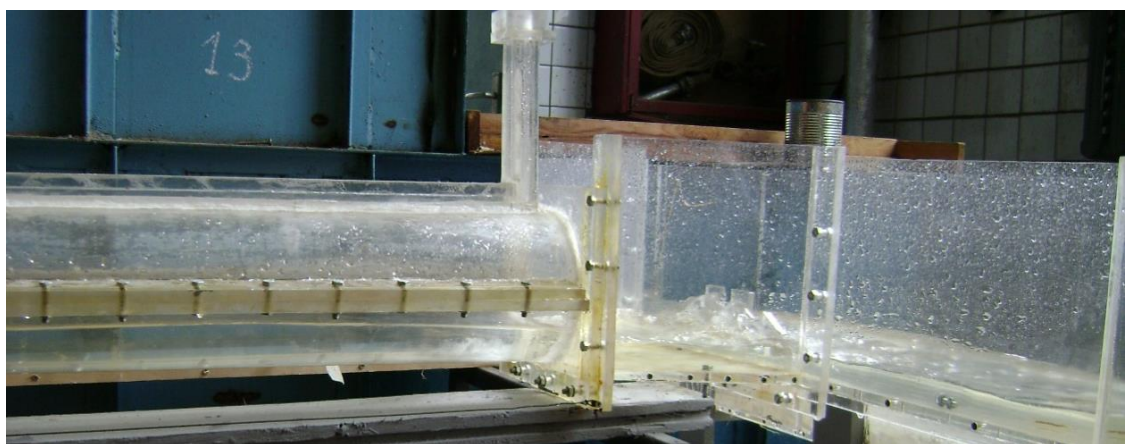


Рисунок 4.41 - Картина движения воды на концевом участке отводящего туннеля при подаче воздуха $Q_a=4 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q=180 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=0,1$

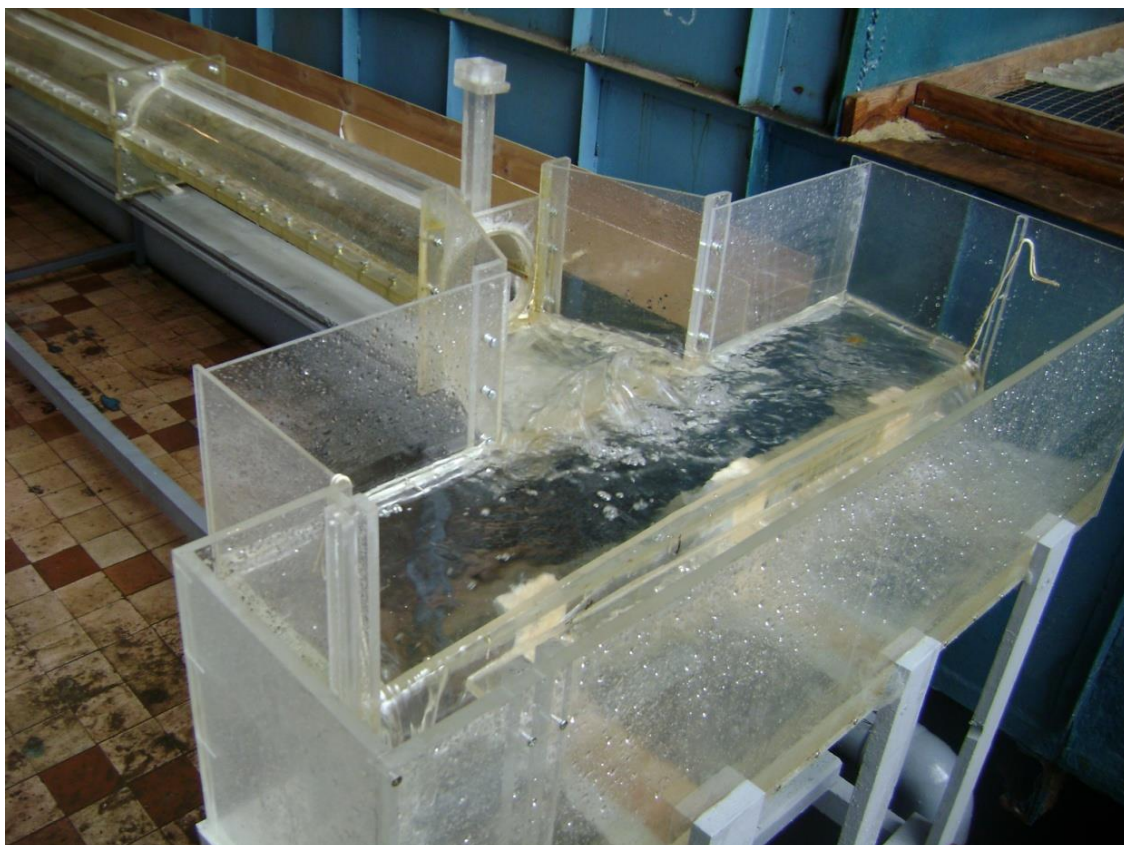


Рисунок 4.42 - Картина движения воды в сопрягающем сооружении при
подаче воздуха $Qa=4 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q=180 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=0,1$

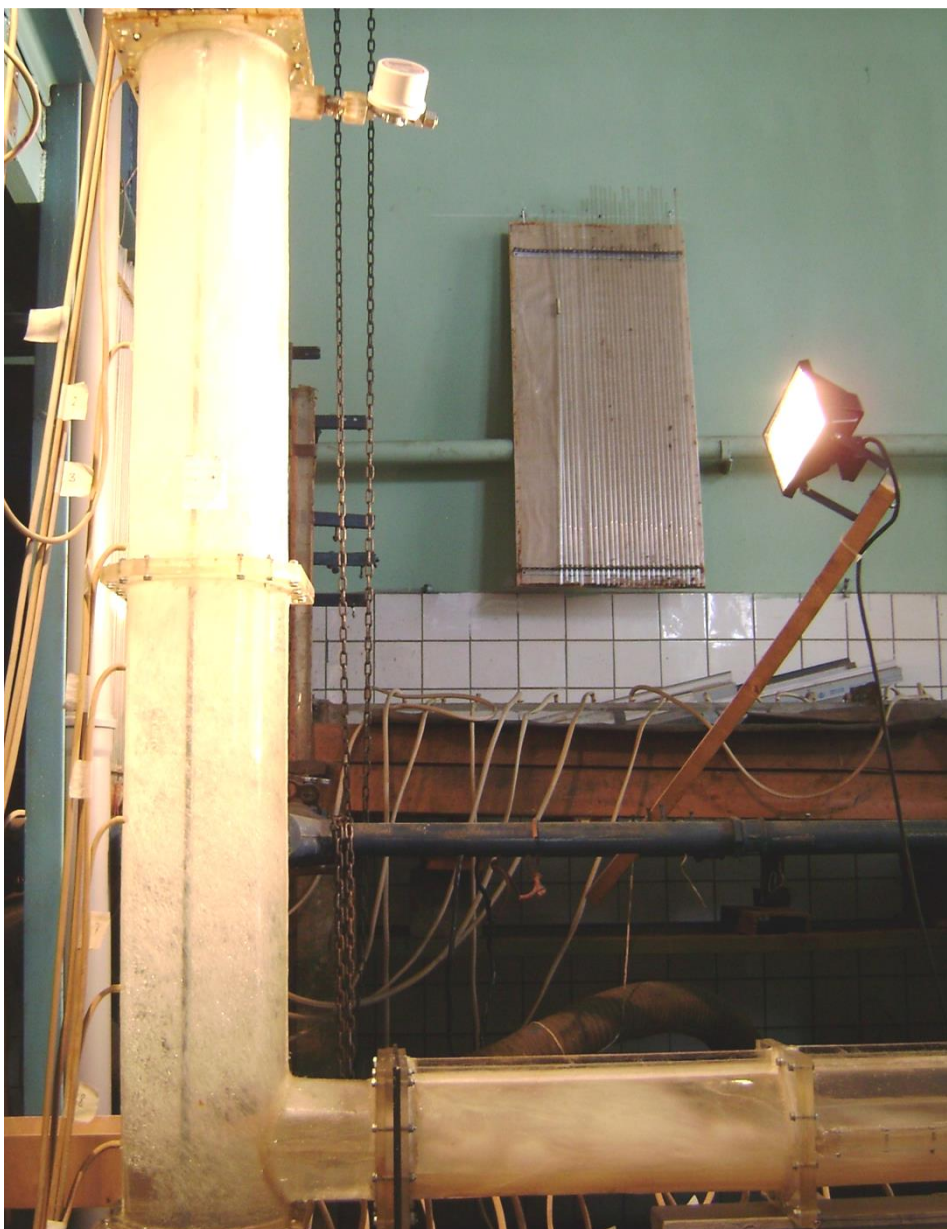


Рисунок 4.43 - Картина движения воды в зоне примыкания
отводящего туннеля к шахте при подаче

$$Q_a=34 \text{ м}^3/\text{с}, Q=1700 \text{ м}^3/\text{с}, a/a_o=0.5$$

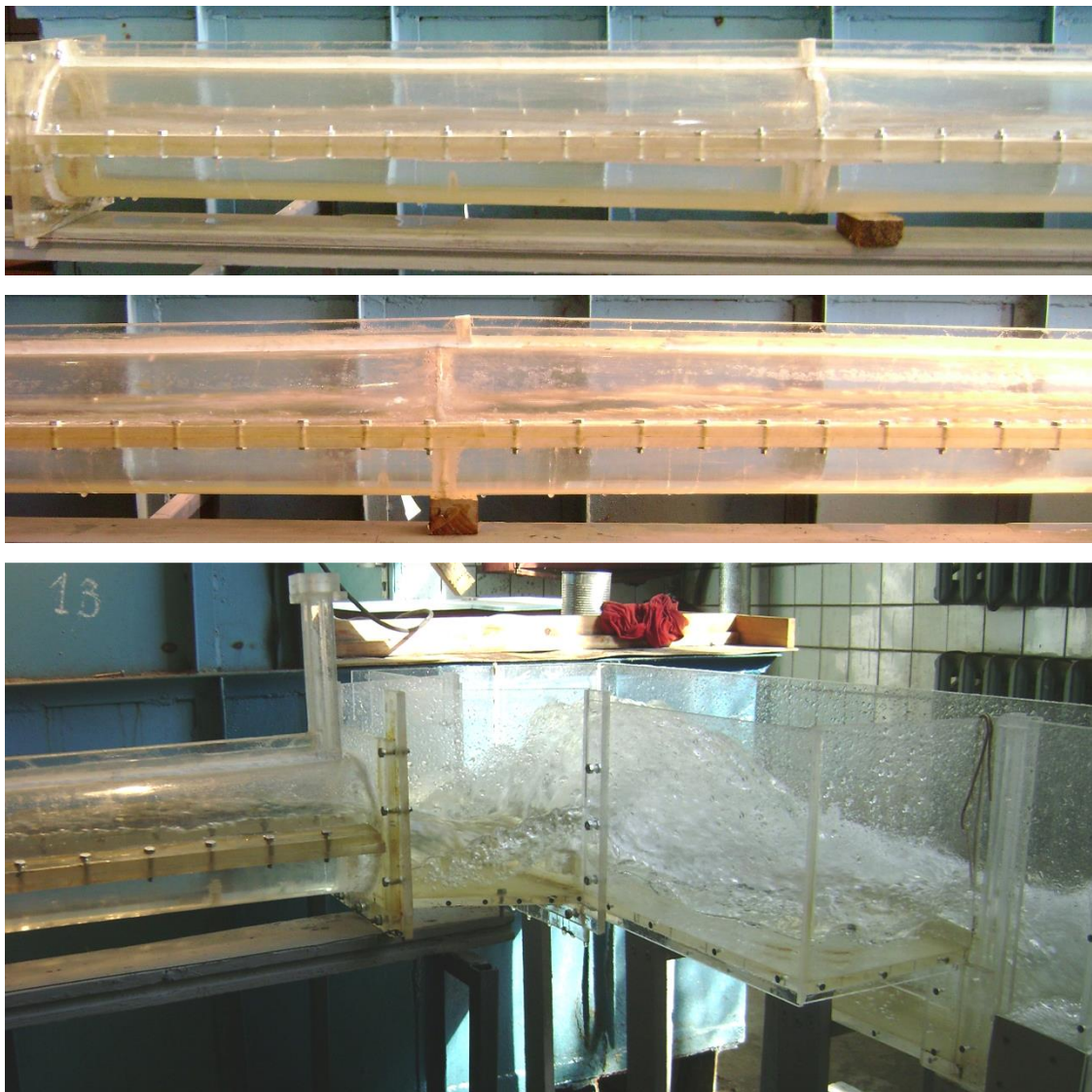


Рисунок 4.44 - Картина движения воды в отводящем туннеле при подаче воздуха

$$Q_a=34 \text{ м}^3/\text{с}, Q=1700 \text{ м}^3/\text{с}, a/a_0=0.5$$



Рисунок 4.45 - Картина движения воды в сопрягающем сооружении при подаче воздуха $Q_a=34 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q=1700 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_o=0.5$

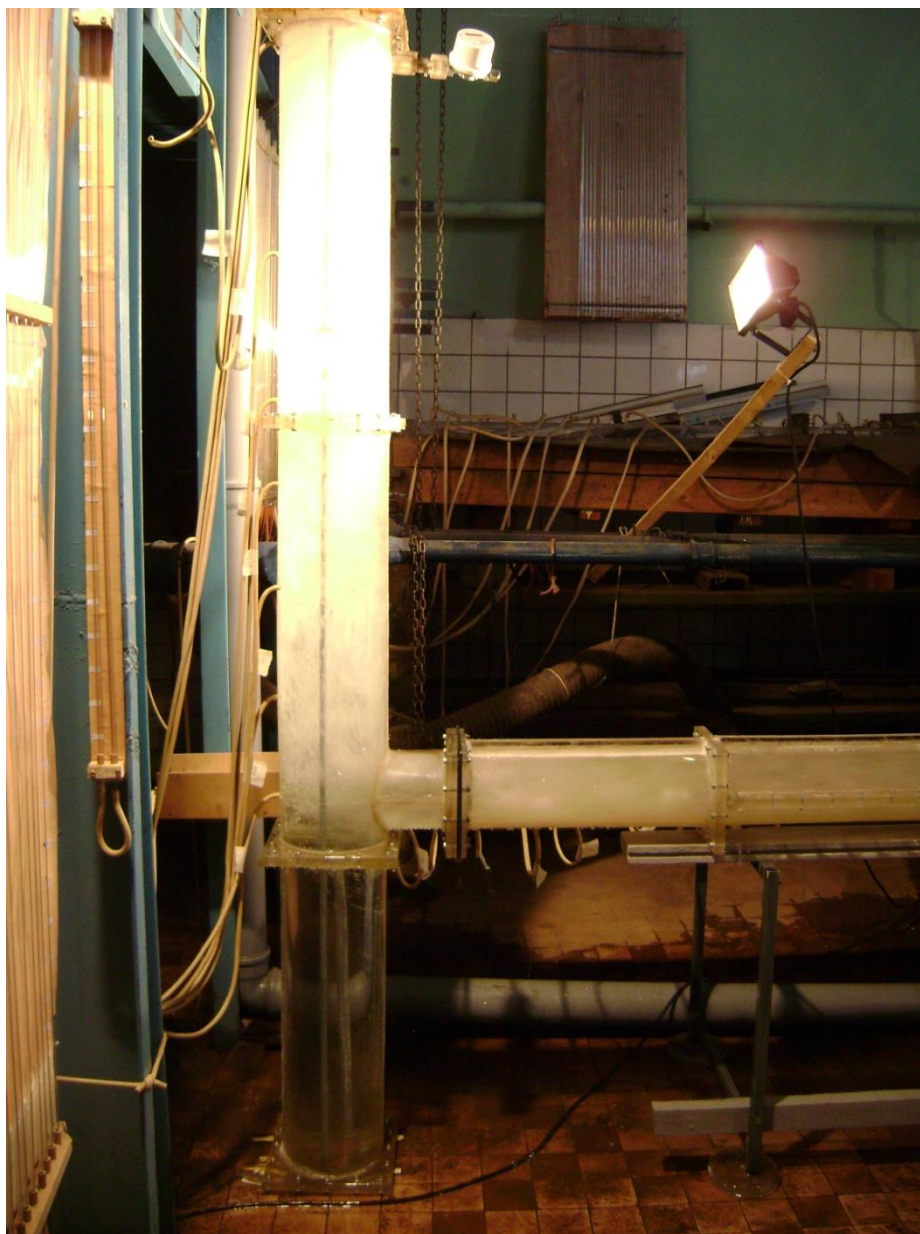


Рисунок 4.46 - Картина движения воды в зоне примыкания отводящего туннеля к шахте при подаче воздуха $Q_a=67 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q=3130 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=1$

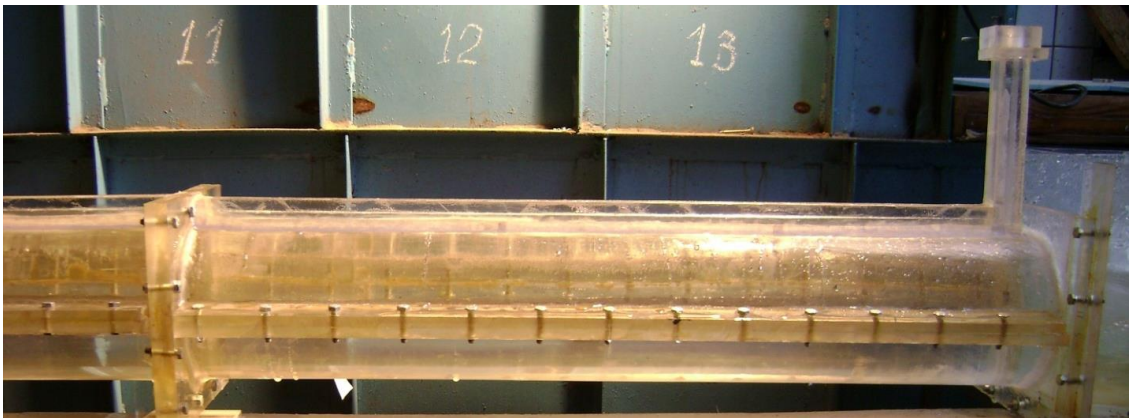
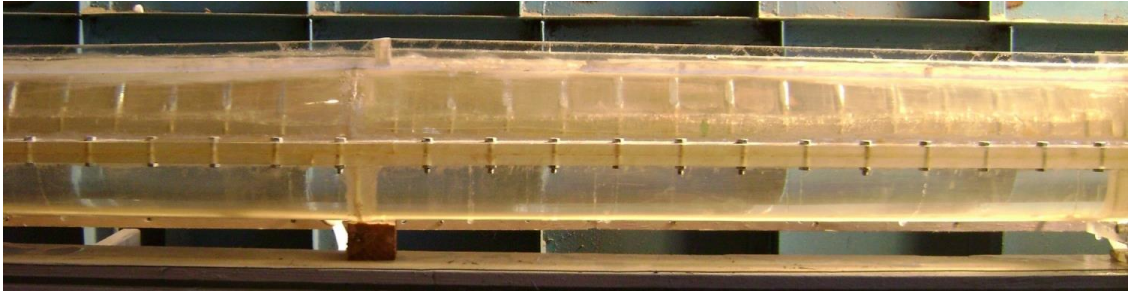
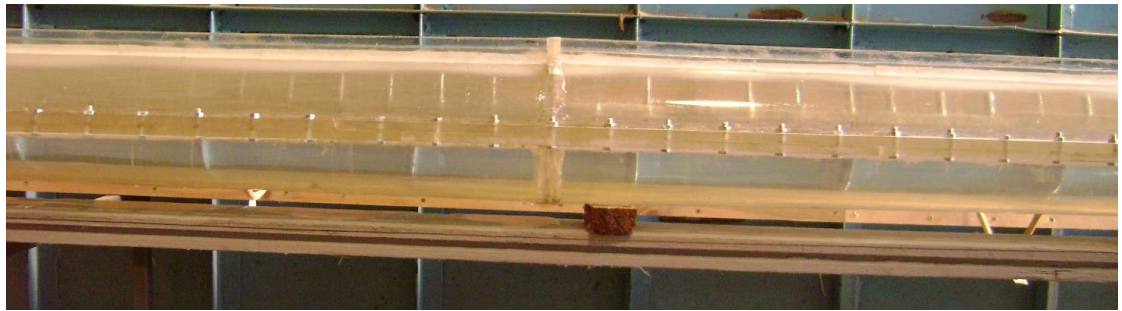


Рисунок 4.47 - Картина движения воды в отводящем туннеле при подаче воздуха $Q_a=67 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q=3130 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=1$



Рис. 4.48. Картина движения воды на концевом участке отводящего туннеля при подаче воздуха $Q_a=67 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q=3130 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=1$

4.7. Распределение давления по высоте ствола шахты

На рис. 4.49 представлены результаты расчётов осреднённого гидродинамического давления по высоте шахты при впуске воздуха 2% от расхода для конструкции водосброса с диафрагмой на входе в отводящий участок туннеля, а на рис. 4.50 — при свободном входе.

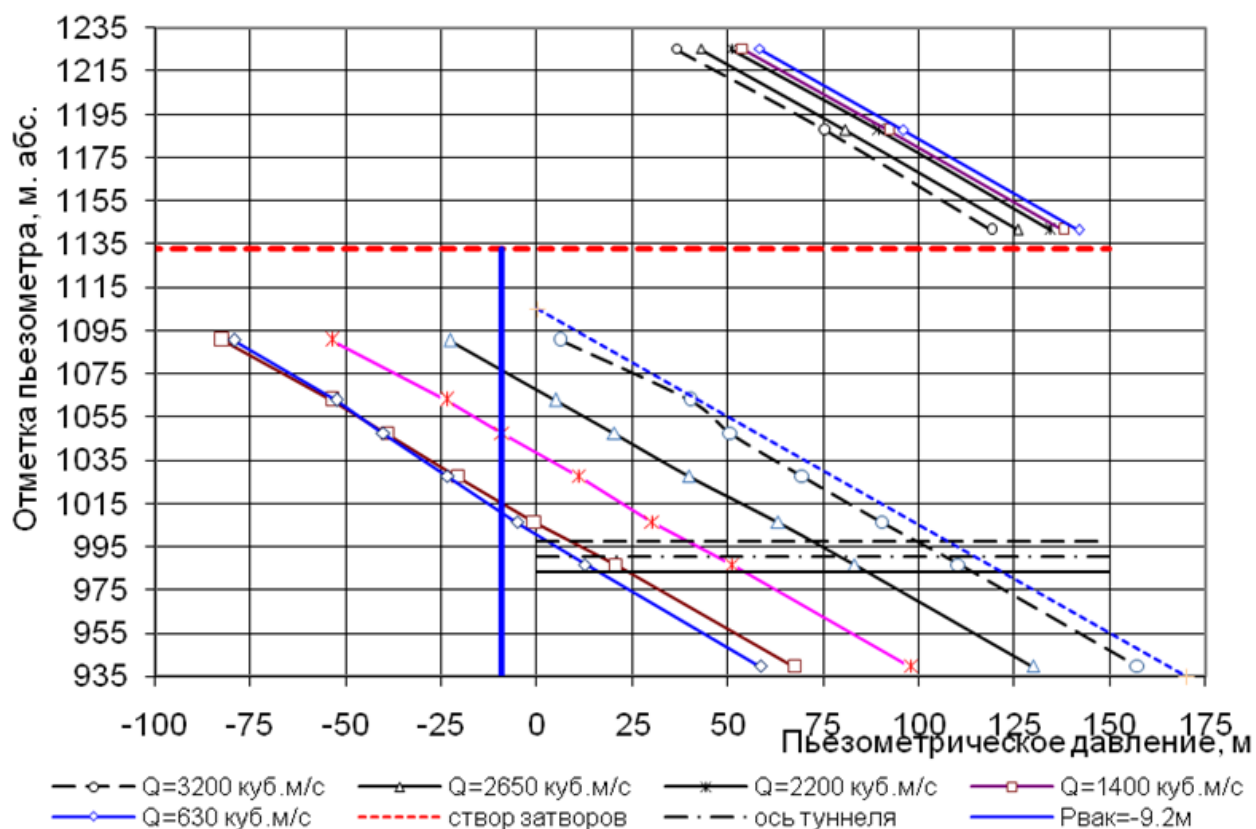


Рисунок 4.49 - Распределение осреднённого гидродинамического давления по высоте шахты при впуске воздуха 2% от расхода водосброса. Вход в туннель с диафрагмой

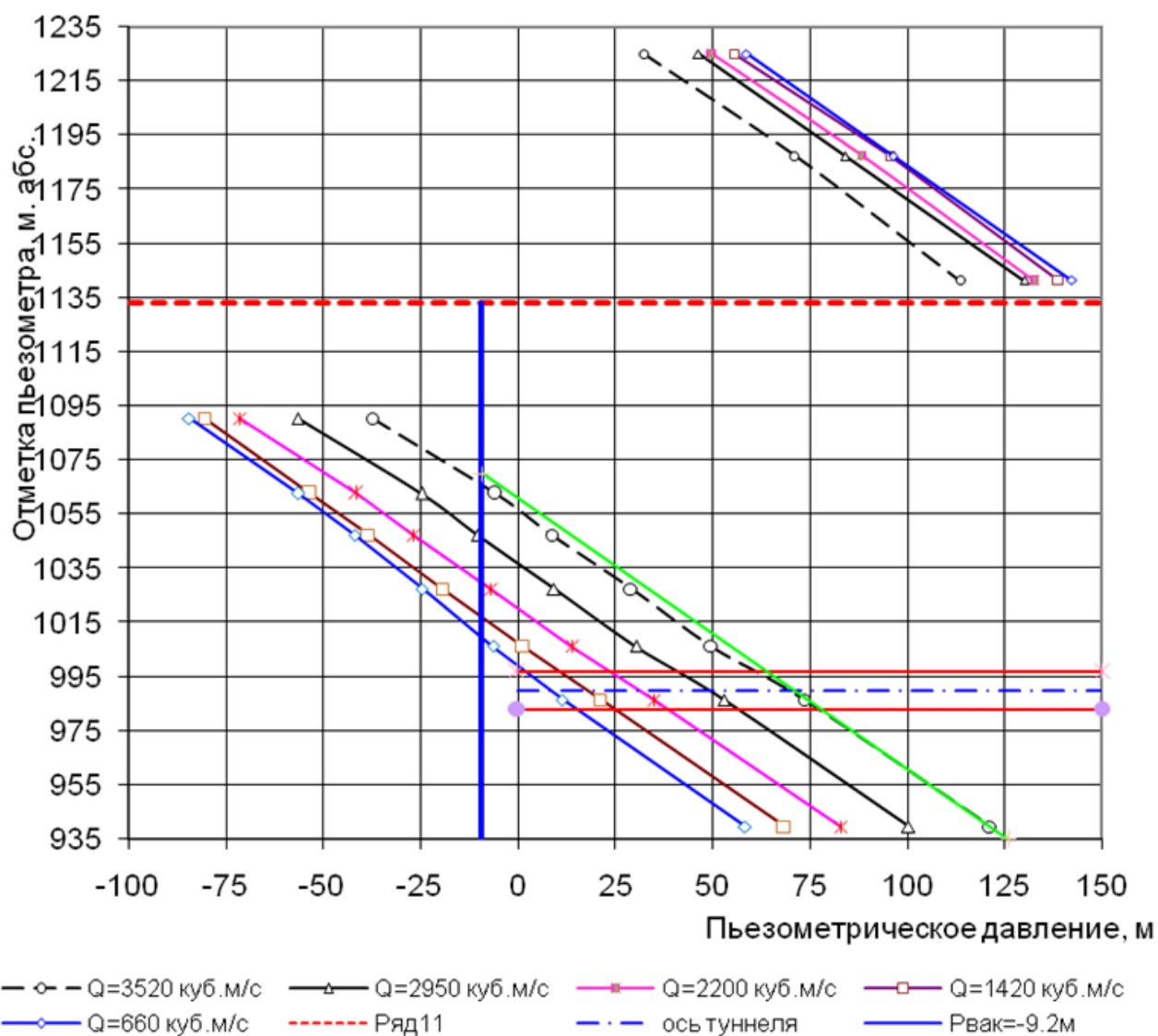


Рисунок 4.50 - Распределение осреднённого гидродинамического давления по высоте шахты. Вход в туннель свободный

Анализ этих графиков позволяет установить, что в напорном верхнем участке туннеля в обоих вариантах отводящего туннеля при всех расходах устанавливается гидростатическое распределение давлений. При этом величина абсолютного давления тем меньше, чем больше расход, что связано с увеличением скорости течения и соответствующим увеличением гидравлических потерь.

В самой шахте, как это видно из фото предыдущих разделов, поток представляет собой водовоздушную смесь, которая по визуальным наблюдениям

достаточно равномерна по высоте ствола шахты. Этим объясняется практически прямолинейное распределение давления по высоте шахты.

Горизонтальное расстояние на рисунках 4.49 и 4.50 от вертикальной линии, соответствующей нулевому давлению, до линии осреднённого гидродинамического давления на уровне шельги туннеля, равны соответствующему напору, необходимому для прохождения этого расхода через входное сечение отводящего туннеля.

Сопоставляя значения этих напоров для входа с диафрагмой и свободным входом, видно, что в диапазоне расходов от $Q=140\ldots3200 \text{ м}^3/\text{с}$ напоры на входе с диафрагмой на 15...40 м больше, чем при свободном входе. Это увеличение напора соответствует гидравлическим потерям в диафрагме. Соответственно, пьезометрические уровни в шахте будут выше для конструкции входа с диафрагмой.

На графиках рис. 4.49 и 4.50 показаны вакуумы, соответствующие модельным данным. В натурных условиях максимальная величина вакуума не может превышать 9,2 м, в соответствии с чем, на этих графиках показана линия максимального вакуума [2, 38, 39, 77, 106]. В натурных условиях при достижении этого вакуума подъём уровня свободной поверхности воды в шахте прекратится и, соответственно, остановится увеличение расхода. Расходная характеристика затворов с учётом реального вакуума будет определяться левой расходной характеристикой рис. 4.26.

На рис. 4.51 приведены скорректированные графики распределения осреднённого гидродинамического давления по высоте шахты при впуске воздуха 2% от расхода водосброса для варианта входа в туннель с диафрагмой. При достижении в шахте вакуума 9,2 м прекратится подъём уровня свободной поверхности воды выше уровня, необходимого для пропуска расхода воды в туннель в соответствии с расходом, пропускаемым через затворную камеру. Над свободной поверхностью воды установится условно безвоздушное пространство, в котором фактический вакуум будет меньше теоретически возможного. Это связано с тем, что в воде постоянно находится растворённый воздух, содержание

которого определяется давлением воздуха. В этих условиях растворимость газа определяется законом Генри-Дальтона, в соответствии с которым масса растворённого газа при данной температуре пропорциональна давлению газа над свободной поверхностью воды. Насыщение воды воздухом будет происходить в процессе движения воды по руслу реки за счёт турбулентного перемешивания.

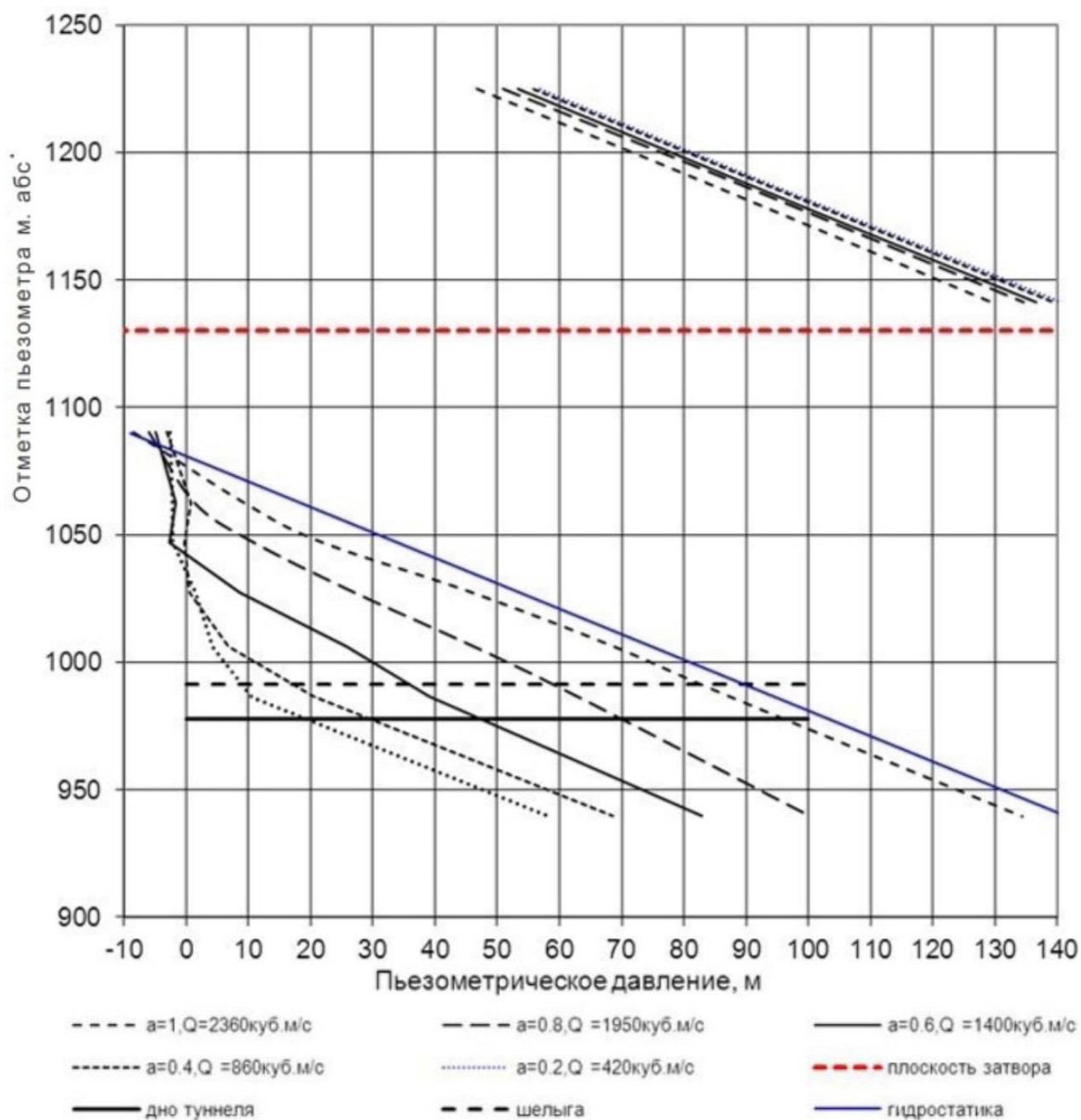


Рисунок 4.51 - Скорректированное распределение осреднённого гидродинамического давления по высоте шахты при впуске воздуха 2% от расхода водосброса. Вход в туннель с диафрагмой

На рис. 4.52 приведены графики зависимости объёмного содержания воздуха в воде для давления газа 760 мм ртутного столба. При отметке НПУ = 1290,0 м давление на поверхности водохранилища будет составлять 8,9 м вод. ст., или $8,9/10,33=0,862P_0$, в соответствии с чем концентрация растворённого в воде воздуха соответственно уменьшится.

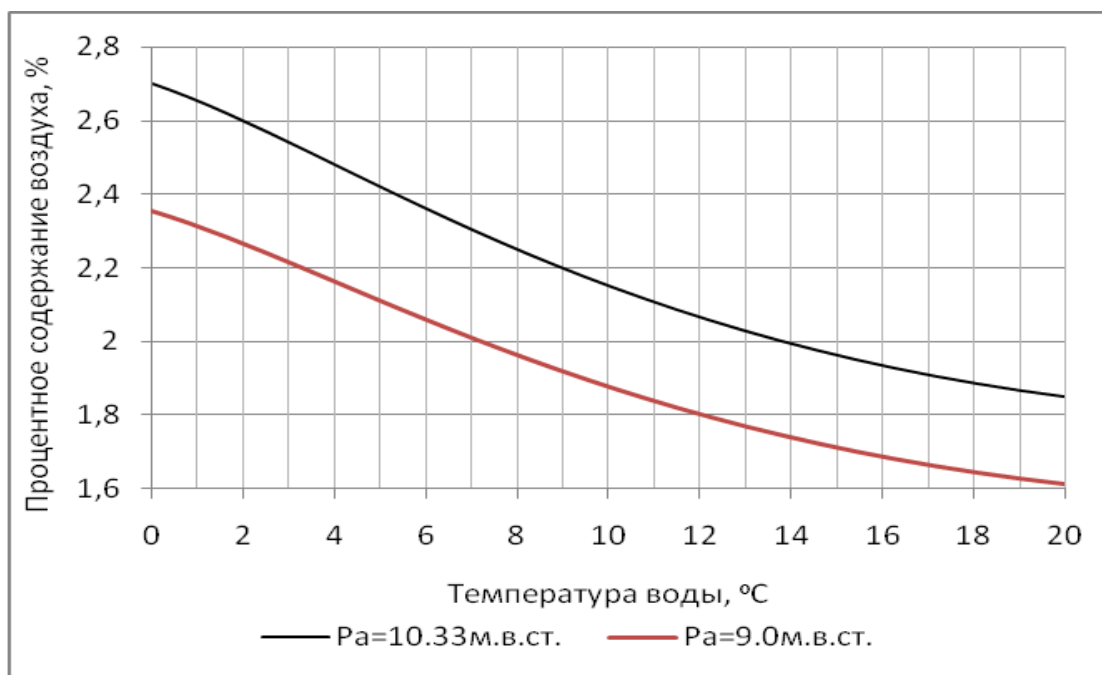


Рисунок 4.52 - Содержание растворённого воздуха в воде

Можно считать, что температура воды в водохранилище Рогунского гидроузла будет в пределах 6...8 °C. При этой температуре в воде содержится порядка 2% воздуха по объёму, который будет выделяться из воды по мере понижения давления в шахте за счёт выноса воздуха из него водой. При отсутствии воздухопроводов, подающих воздух в шахту, в шахте может быть достигнут абсолютный вакуум. При расходе $Q=3500 \text{ м}^3/\text{с}$ расход выделяющегося воздуха может составить $Q_{\text{возд}}=70 \text{ м}^3/\text{с}$. Частично этот воздух будет выноситься потоком, а частично будет накапливаться над свободной поверхностью, уменьшая величину вакуума. Расширение выделившегося объёма воздуха и снижение давления будут происходить в соответствии с законами Бойля–Мариотта.

4.8. Распределение давления по длине отводящего туннеля

На рис. 4.53 представлены результаты распределения осреднённого гидродинамического давления по длине отводящего туннеля при впуске воздуха 2% от расхода для конструкции водосброса с диафрагмой на входе в отводящий участок туннеля, а на рис. 4.54 — то же при свободном входе [3, 4, 5, 6].

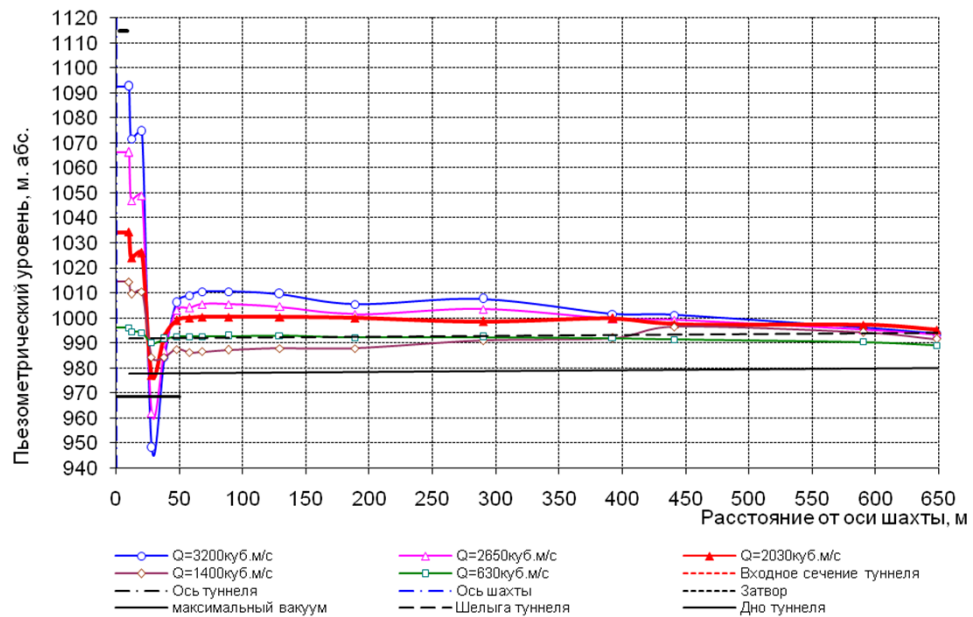


Рисунок 4.53 - Распределение осреднённого гидродинамического давления по длине отводящего туннеля. Вход в туннель с диафрагмой

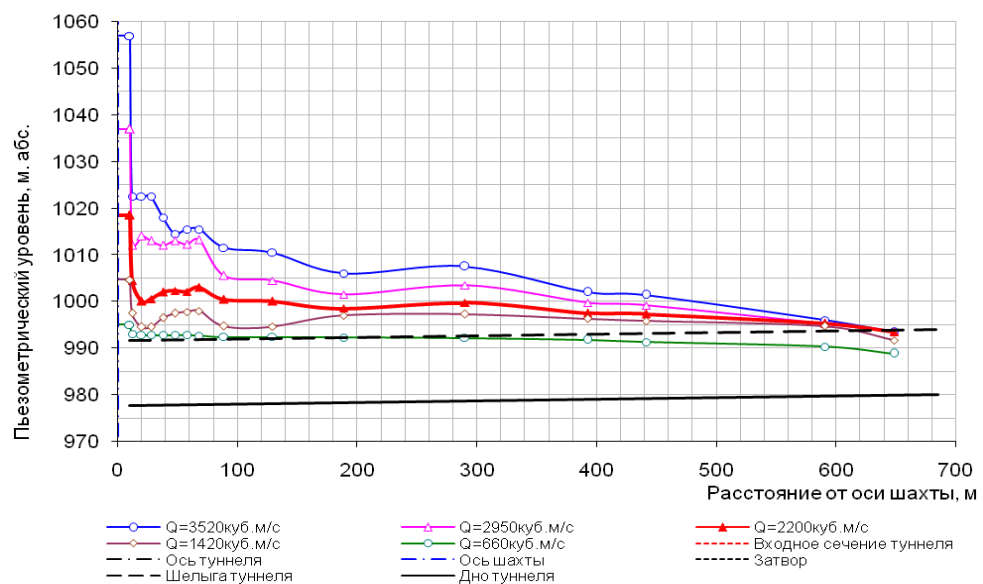


Рисунок 4.54 - Распределение осреднённого гидродинамического давления по длине отводящего туннеля. Вход в туннель свободный

Анализ этих графиков позволяет установить, что на начальном участке туннеля в обоих вариантах конструкции входа в отводящий туннель при всех расходах устанавливается идентичное распределение давлений. Отличие заключается в характере изменения давления и его величины на начальном участке в зоне установки диафрагмы и в зоне выравнивания режима течения за диафрагмой.

Целью установки диафрагмы было желание смягчить гидродинамическое давление на дно шахты при пропуске малых расходов за счёт увеличения сопротивлений на вход и соответствующего увеличения глубины воды в шахте. Диаграммы распределения давления подтверждают этот эффект. Так, при пропуске расхода $3200 \text{ м}^3/\text{с}$ это увеличение глубины превышает 25 м. Однако этот эффект снижается при уменьшении расхода в квадратичной зависимости. Так, при расходе $650 \text{ м}^3/\text{с}$ это увеличение составляет всего 1,5 м.

В то же время установка диафрагмы резко ухудшает гидравлический режим движения воды в отводящем туннеле. Как видно по графикам рис. 4.53, за счёт восстановления энергии потока за диафрагмой происходит снижение давления с образованием вакуума больше физически возможной величины при расходах более $1800 \text{ м}^3/\text{с}$. Так что следует признать, что установка диафрагмы в отводящем туннеле нецелесообразна. Устранение диафрагмы в туннеле со свободным входом делает распределение осреднённого гидродинамического давления более благоприятным.

На рис. 4.55 приведены результаты расчётов необходимых уровней воды в шахте для пропуска соответствующих расходов через отводящий туннель диаметром $d=16,0 \text{ м}$.

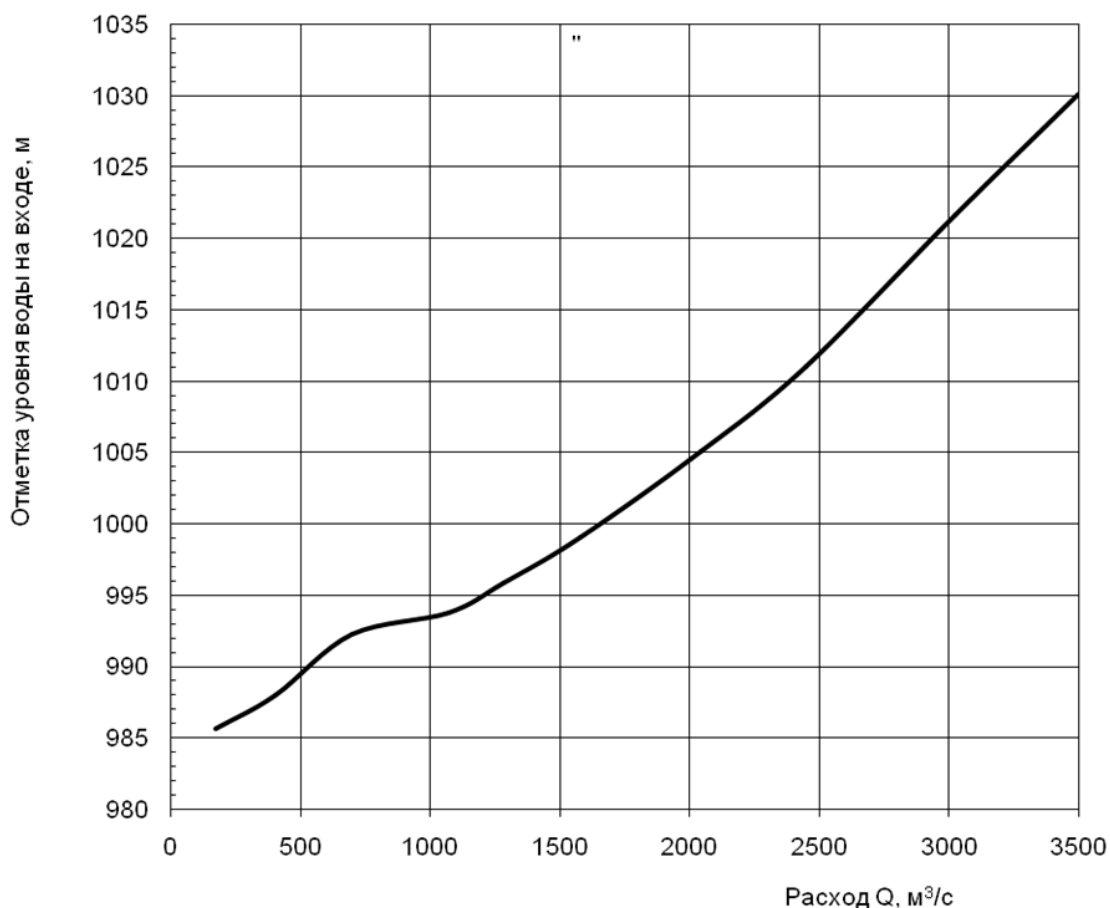


Рисунок 4.55 - Уровень воды в шахте в зависимости от расхода при $i=+0,001$

По графику рис. 6.11 видно, что при пропуске максимального расхода 3500 м³/с в шахте установится уровень воды на отметке 1030.0м. Учитывая подъём уровня воды за счёт образования вакуума, отметка уровня воды может составить 1039.2м, превысив при этом отметку дна подводящего туннеля на выходе на 5 метров. При диаметре подводящего туннеля диаметром $d=15.0$ м подтопление не представляет помех для выхода воды в шахту.

Выводы по главе

1. На построенной физической модели вакуумного шахтного гасителя энергии для проведения лабораторных экспериментов выполнены гидравлические исследования работы шахты с горизонтальной затворной камерой. Экспериментальное изучение гашения энергии потока в шахте проведено для трёх режимов: для режима со свободным доступом воздуха в шахту; для режима без доступа воздуха в шахту; для режима с дозированной подачей воздуха в шахту в соответствии с возможным количеством его выделения из воды.

2. Гашение энергии в шахте во всех режимах сопровождается формированием в шахте водовоздушной массы, воздействие которой на бетон обделки безопасно с точки зрения возможности кавитационной эрозии даже при глубоком вакууме. По экспертной оценке, при свободной подаче воздуха в шахту количество захватываемого воздуха соизмеримо с расходом воды, что вызывает в отводящем туннеле безнапорный режим течения, что приводит к увеличению скоростей течения с соответствующим осложнением гашения энергии потока в нижнем бьефе.

3. Система удаления воздуха из туннеля показала хорошую работу, предупреждая возможность залпового выброса воздуха из туннеля, вызванного устройством отводящего уклона с обратным уклоном.

4. Модельные гидравлические исследования работы шахтного вакуумного гасителя энергии потока показали его эффективность не только в диапазоне расчётных расходов, но и в диапазоне, в два с лишним раза превышающем расчётный расход сооружения.

5. Изучена работа узла сопряжения шахты с туннелем как при сопряжении «дно в дно», так и с удлинённой шахтой. Продление шахты ниже дна входного сечения туннеля позволяет улучшить гидравлический режим в туннеле и отказаться от демпфирующего сопротивления в виде диафрагмы, установленной за входным сечением туннеля.

6. Установлено, что при полном открытии затворов за счёт выноса воздуха из шахты гашения энергии пропускная способность затворной камеры без выпуска воздуха возрастает на 27% по сравнению с режимом с впуском воздуха. При уменьшении степени открытия затворов эта разница увеличивается, достигая максимума 50% при $a/a_0=0,3$.

7. Применение дефлекторов в виде плоских пластин на опорных гранях отверстий затворной камеры и затворов позволило улучшить растекание потока за затвором, однако в диапазоне открытий $a/a_0=0,3\ldots 0,8$ сохраняется контакт падающих струй с поверхностью стенки шахты.

8. Установка диафрагмы в отводящем туннеле нецелесообразна, поскольку приводит к образованию вакуума, превышающего физически возможную величину, при расходах более 1800 м³/с. Устранение диафрагмы и обеспечение со свободным входом в туннель делает распределение осреднённого гидродинамического давления более благоприятным.

Заключение

1. Анализ отечественной и мировой практики проектирования, строительства и эксплуатации энергогасящих элементов водосбросных сооружений показал, что ключевым моментом обеспечения надёжности их работы является борьба с вакуумом. До настоящего времени вопросам изучения поведения потока воды в условиях вакуума обращалось мало внимания, поэтому не известны и законы, определяющие характер ситуации, складывающейся в водопропускном тракте при его наличии.

2. Теоретически обоснована работа вакуумного шахтного гасителя энергии, оборудованного механическими затворами. Приведенные данные теоретических и экспериментальных исследований работы вакуумной шахты, как гасителя энергии, подтверждают гипотезу о возможности её применения на высоко- и средненапорных гидроузлах. За счёт дробления струи и перемешивания жидкости здесь достигается значительная эффективность гашения энергии.

Выявлены наиболее благоприятные режимы, соответствующие минимальным скоростям воды по длине отводящего туннеля, получающиеся при обратном уклоне $i = -0,003$, при котором полным сечением отводящий туннель начинает работать уже при расходе $Q = 1000 \text{ м}^3/\text{с}$. Аэрация потока, поступающего в отводящий туннель в натуральных условиях, не будет превосходить 2% от расхода воды, что не может вызвать перехода режима движения воды из напорного в безнапорный. С использованием расчетного графика зависимости растворимости воздуха в воде от температуры установлено, что для условий верхнего бьефа Рогунской ГЭС содержание воздуха в воде может составить около 2,4%.

Анализ полученных зависимостей пропускной способности водовода круглого сечения от его наполнения h/d и критического уклона от расхода и диаметра водовода показал, что при уклонах дна отводящего туннеля менее $i < 0,002$ при всех расходах в выходном сечении устанавливается кривая спада с минимальной глубиной, равной критической.

3. Предложено техническое решение, которое позволяет исследовать сложные процессы, происходящие в шахте гашения энергии потока, связанные с образованием вакуума, которые не поддаются моделированию. В этой связи невозможно одновременно изучать процесс гашения энергии в шахте и гидравлические режимы, устанавливающиеся в отводящем туннеле. По этой причине работа исследуемой конструкции шахтного гасителя изучалась для двух схем работы шахты: с подачей воздуха и без его доступа в шахту. Первый режим работы системы «шахтный гаситель-отводящий туннель» соответствовал схеме работы шахты со свободным падением воды за затворной камерой. При втором режиме работы системы в отводящем туннеле формировались гидравлические режимы, соответствующие реальным граничным условиям.

4. На физической модели вакуумного шахтного гасителя энергии выполнены гидравлические исследования работы шахты с горизонтальной затворной камерой. Изучение распределения давления в проточном тракте производилось для варианта с двумя затворами размером в свету 6.0х4.0м каждый. Экспериментальное изучение гашения энергии потока в шахте было проведено для трёх режимов: для режима со свободным доступом воздуха в шахту; для режима без доступа воздуха в шахту; для режима с дозированной подачей воздуха в шахту в соответствии с возможным количеством его выделения из воды.

Изучение работы затворной камеры затворов позволило установить, что в диапазоне открытий затворов $a/a_0 = 0.3...0.8$ наблюдается контакт падающих струй с поверхностью стенки шахты. Для улучшения картины движения струй внутри шахты затворной камеры и затворах были прикреплены дефлекторы в виде плоских пластин. На затворной камере ширина пластин составляла 2.2 м, а на затворах - 1.2 м. В этой серии экспериментов расход изменялся от $Q = 460 \text{ м}^3/\text{с}$ до $2300 \text{ м}^3/\text{с}$ при открытиях затворов соответственно от $a/a_0 = 0,2$ до $a/a_0 = 1.0$.

5. Гашение энергии в шахте во всех режимах сопровождается формированием в ней водовоздушной массы, воздействие которой на бетон обделки безопасно с точки зрения возможности возникновения кавитационной

эрозии. В процессе экспериментов было установлено, что при свободной подаче воздуха вакуум в шахте гашения энергии достигал $h_{\text{вак}} = 0.3$ м при расходе затворной камеры на модели 22...25 л/с, чему соответствовал расход воздуха 11 л/с, что соизмеримо с расходом воды. Этот режим важен был для изучения характера свободного падения воды за затворной камерой. По экспертной оценке избыточное содержание воздуха в потоке вызывает в отводящем туннеле безнапорный режим течения, что приводит к увеличению скоростей течения с соответствующим осложнением гашения энергии потока в нижнем бьефе. В то же время аэрация потока, поступающего в отводящий туннель в натуральных условиях, не будет превосходить 2% от расхода воды и в туннеле установится напорный режим.

Система удаления воздуха из туннеля показала хорошую работу, предупреждая возможность залпового выброса воздуха из туннеля, вызванного устройством последнего с обратным уклоном. Воздуховод на шельге туннеля имел размеры: сечение - 1х1 м, диаметр отверстий - 0.6 м, шаг - 60 м.

6. Модельные гидравлические исследования работы вакуумного шахтного гасителя энергии потока показали его эффективность в широком диапазоне изменения расходов, значительно превосходящих расчетные значения. При этом модель сопрягающего участка со специально установленной прорезной стенкой, обеспечивала принудительное растекание выходящего из туннеля потока.

Изучена работа узла сопряжения шахты с туннелем как при сопряжении «дно в дно», так и с удлиненной шахтой. Продление шахты ниже дна входного сечения туннеля позволяет улучшить гидравлический режим в туннеле и отказаться от демпфирующего сопротивления в виде диафрагмы, установленной за его входным сечением. Для этого была исследована модель шахты с колодцем, расположенным ниже дна входного сечения туннеля на 70 м, с затворной камерой со скругленными гранями и с дефлекторами, с подачей воздуха в шахту в количестве около 2% от расхода воды, в диапазоне от $Q_a = 4 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q = 180 \text{ м}^3/\text{с}$, при $a/a_o = 0,1$ до $Q_a = 67 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q = 3130 \text{ м}^3/\text{с}$ при $a/a_o = 1$.

Рекомендации и перспективы дальнейшего развития темы исследований

Для дальнейшего изучения и исследования рассмотренного в данной работе шахтного способа гашения энергии необходимо: разработать схему маневрирования затворами; изучить пульсацию гидродинамического давления в шахте и отводящем туннеле с целью определения гидродинамических нагрузок и расчётных усилий, воздействующих на бетонную облицовку; разработать конструкцию узла сопряжения туннеля с руслом реки на основе проведенных модельных исследований; изучить вопрос влияния аэрации потока на величину местных гидравлических потерь и потерь по длине водопропускного тракта в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация гидротехнических сооружений / Под ред. А.А. Морозова. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 280 с.
2. Агроскин, И.И. Гидравлика. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1954. — 352 с.
3. Алексеев, Д. А. Особенности работы модели вакуумного шахтного водосброса / Д. А. Алексеев, Н. В. Ханов, Т. Ю. Жукова // Инновационные технологии и повышение эффективности производственных процессов в сфере строительства, природообустройства и агроинженерии: Материалы VI Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Нальчик, 05 июня 2026 года. – Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова, 2026. – С. 83-88. – EDN VFZLWZ.
4. Алексеев, Д. А. Результаты исследования влияния шахтного гасителя энергии на образование волнового движения воды в отводящем туннеле / Д. А. Алексеев, Н. В. Ханов, Т. Ю. Жукова // Мелиорация и гидротехника. – 2026. – Т. 16, № 1. – С. 250-262. – DOI 10.31774/2712-9357-2026-16-1-250-262. – EDN RQKAXC.
5. Алексеев, Д. А. Распределение гидродинамического давления в шахтном водосбросе с вакуумным гасителем энергии / Д. А. Алексеев, А. П. Гурьев, Н. В. Ханов, Т. Ю. Жукова, Н. Б. Мартынова // Мелиорация и водное хозяйство. – 2026. – № 3. – С. 09–12.
6. Алексеев, Д. А. Уточнение допустимых величин вакуума на модели шахтного водосброса Рогунской ГЭС / Д. А. Алексеев // Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 160-летию Тимирязевской академии: Сборник статей, Москва, 02–04 июня 2025 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет, 2025. – С. 25-29. – EDN NOJMIL.
7. Алексеев Д.А. Методика проведения лабораторных исследований вакуумного шахтного гасителя энергии / Д. А. Алексеев, Н. В. Ханов, Л. С.

Дейнеко [и др.] // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2025. – № 2(96). – С. 155-170. – EDN LGCPWE.

8. Ахутин, А. Н. Шахтные водосливы/ А. Н. Ахутин // Гидротехническое строительство. – 1935. – № 4.

9. Аэрация водосбросных потоков / Под ред. В.М. Лятхера. – М.: Энергия, 1978. – 240 с.

10. Балакирский, Н. Н. Кольцевой водослив – водоспуск для прудов-водохранилищ / Н. Н. Балакирский // Гидротехническое строительство. – 1938. – № 12.

11. Барышников, Н.Б. Гидравлические расчёты. – СПб.: Лань, 2012. – 384 с.

12. Большаков, В.А. Справочник по гидравлике. – Киев: Вища школа, 1984. – 343 с.

13. Бурков, А. Ф. Выбор конструктивных схем гашения энергии за высокими водосливными плотинами / А. Ф. Бурков // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – Л. –М.: Госэнергоиздат, 1963. – Т. 72.

14. Вакуум в гидротехнических сооружениях / Под ред. И.И. Агроскина – М.: Госэнергоиздат, 1958. – 200 с.

15. Вакуумные водосбросы / Под ред. Ф.Г. Гунько — Л.: Энергия, 1980. – 200 с.

16. Васильев, О. Ф. Некоторые вопросы механики винтовых и циркуляционных потоков / О. Ф. Васильев // Сборник трудов МИСИ им. В. В. Куйбышева. – 1955. – № 9.

17. Васильев, О. Ф. О проектировании и расчете шахтных водосбросов с аэрацией потока по длине ствола / О. Ф. Васильев, В. И. Букреев, Е. М. Романов // Труды координационных совещаний по гидротехнике. – Л. –М.: Госэнергоиздат, 1963. – Вып. VII.

18. Вибрации в гидротехнических сооружениях / Под ред. В.М. Лятхера. – М.: Энергия, 1976. – 280 с.

19. Водосбросные сооружения / Под ред. В.П. Недриги. – М.: Стройиздат, 1980. – 312 с.

20. Воронкообразование в водоприемниках шведских ГЭС // Реферативный журнал «Механика». – 1955. – Реф. № 786.
21. Вычислительная гидродинамика / Под ред. О.М. Белоцерковского. – М.: Наука, 1989. – 320 с.
22. Вяземский, О. В. Расширение применения сифонных водосливов / О. В. Вяземский // Гидротехническое строительство. – 1946. – № 1.
23. Герметичность гидротехнических сооружений / Под ред. В.В. Скорчеллетти. – Л.: Энергия, 1978. – 240 с.
24. Гидравлика / под ред. И. И. Агроскина. – М.: Госстройиздат, 1944.
25. Гидравлика водосбросных сооружений / Под ред. С.М. Слисского. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
26. Гидравлические затворы / Под ред. А.А. Морозова. – М.: Энергия, 1976. – 240 с.
27. Гидравлические исследования вакуумных водосбросов. – М.: Энергия, 1982. – 180 с.
28. Гидравлические расчёты водосбросных сооружений / Под ред. Ф.Г. Гунько. – Л.: Энергия, 1974. – 208 с.
29. Гидравлические сопротивления / Под ред. И.Е. Идельчика. – М.: Энергия, 1975. – 280 с.
30. Гидродинамика многофазных сред / Под ред. Р.И. Нигматулина. – М.: Наука, 1987. – 360 с.
31. Гидротехнические сооружения / Под ред. Н.П. Розанова. – М.: Стройиздат, 1978. – 420 с.
32. Гидротехнические сооружения. Справочник / Под ред. В.П. Недриги. — М.: Стройиздат, 1983. – 420 с.
33. Годзевич, А. П. Водослив-водоспуск систем И. Н. Фалеева, А. П. Годзевича // Водное дело. – 1907. – № 6 – 7.
34. Гришин, М. М. Гидротехнические сооружения: ч. I. – М.: Госстройиздат, 1947.

35. Губин, Ф. Ф. Современное гидроэлектростроительство в США. – М. – Л.: Энергоиздат, 1934.
36. Губин, Ф. Ф., Купперман, В. Л. Экономика водного хозяйства и гидротехнического строительства. – М.: Стройиздат, 1965.
37. Гунько, Ф.Г. Гидравлические расчёты туннельных и трубчатых водосбросов гидроузлов. – Л.: Энергия, 1974. – 208 с.
38. Гурьев А.П. Теоретическое обоснование работы вакуумного шахтного гасителя энергии потока / А. П. Гурьев, Д. В. Козлов, Н. В. Ханов, Д. А. Алексеев // Гидротехническое строительство. – 2024. – № 5. – С. 24-33. – DOI 10.34831/EP.2024.36.58.004. – EDN GJYMKJ.
39. Гурьев, А.П. Теоретическое обоснование работы вакуумного шахтного гасителя энергии потока воды / А. П. Гурьев, Д. В. Козлов, Н. В. Ханов, Д. А. Алексеев // Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства: Сборник тезисов докладов VI Всероссийского научно-практического семинара, Москва, 24 мая 2023 года. – Москва: Издательство МИСИ-МГСУ, 2023. – С. 120-121. – EDN DZSDPR.
40. Дудкин, А. С. Щугосброс-воронка / А. С. Дудкин // Гидротехническое строительство. – 1952. – № 24.
41. Елизарян, Б. О. Техничко-экономическое обоснование пропускной способности водосбросных сооружений гидроузлов / Б.О. Елизарян // Сборник научных трудов Ереванского политехнического института. – Ереван, 1965.
42. Железняков, Г.В. Гидравлика и гидрология. – М.: Транспорт, 1989. – 368 с.
43. Замарин, Е. А., Фандеев В. В. Гидротехнические сооружения. – М.: Сельхозгиз, 1954.
44. Затворы гидротехнических сооружений / Под ред. В.Я. Мартенса. – М.: Машиностроение, 1978. – 320 с.
45. Зудов, С. В. Новый метод расчета шахтного водослива // Труды ВИСУ. Гидротехнический сборник. – М.: Госстройиздат, 1932. – № 4.

46. Иванова, Т. В. Гидравлический расчет шахтного водосброса / Т. В. Иванова // Гидротехническое строительство. – 1939. – № 3.
47. Иванова, Т. В. Работа шахтных водосбросов / Т. В. Иванова // Гидротехническое строительство. – 1940. – № 2.
48. Кавитация в гидротехнических сооружениях / Под ред. Р.Т. Кнаппа. – М.: Энергия, 1974. – 320 с.
49. Киселёв, П.Г. Гидравлика. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
50. Киселев, П. Г. Справочник по гидравлическим расчетам. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. –Л.: Госэнергоиздат, 1961.
51. Козлов, Д.В. Аэрация в водосбросных сооружениях. – М.: МГСУ, 2005. – 180 с.
52. Козлов, Д.В. Гидравлика водосбросных сооружений. – М.: МГСУ, 2010. – 216 с.
53. Рассказов, Л. Н. Гидротехнические сооружения : учебник для вузов : в 2 частях / Л. Н. Рассказов, В. Г. Орехов, Н. А. Анискин [и др.]. — Москва : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2008. — Ч. 1. — 576 с.
54. Константинов, Ю. М. Гидравлический расчет безнапорных водоводов замкнутого сечения при неравномерном движении воды / Ю. М. Константинов // Гидравлика и гидравлика: межведомственный республиканский научно-технический сборник. – 1966. – № 3.
55. Золотов, Л. А. Тенденции в проектировании гидротехнических водосбросных сооружений с учётом кавитации и динамических нагрузок. / Л. А. Золотов, В. М. Семенов // Гидротехническое строительство. – 1985. – №7. – С. 4 – 9.
56. Кочегура, М. А. Лабораторные исследования шахтных водосбросов низконапорных плотин / М. А. Кочегура // Известия Института гидрологии и гидротехники АН УССР. – 1954. – Т. II (XVIII).
57. Латышенков, А. М., Лобачев, В. Г. Гидравлика. – М., 1956.
58. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1978. – 736 с.

59. Лятхер, В.М. Турбулентность в гидросооружениях. – М.: Энергия, 1968. – 320 с.
60. Масштабирование гидротехнических сооружений / Под ред. С.М. Слисского. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 280 с.
61. Милович, А. Теория, расчет и конструкция водоспуска гидроэлектрической станции на р. Аджарис-Цхали близ г. Батуми / А. Милович // Труды института сооружений. – М. –Л.: Гостехиздат, 1930. – Вып. 5.
62. Многоступенчатые перепады / Под ред. А.И. Богомолова. – М.: Энергия, 1978. – 240 с.
63. Мойс, П. П. К вопросу о расчете шахтных водосбросов // Сборник трудов МИСИ им. В. В. Куйбышева. – М.: Госстройиздат, 1958. – Вып. II (№ 24).
64. Мойс, П. П. Масштабные поправки к коэффициенту расхода круговых в плане водосливных воронок / П. П. Мойс // Сборник трудов МИСИ им. В. В. Куйбышева. – М.: Госстройиздат, 1964. – № 46.
65. Мойс, П. П., Пашков, Н. Н., Розанов, Н. П., Тужилкин, А. М. Лабораторные гидравлические исследования вариантов берегового водосброса Чарвакского гидроузла / П. П. Мойс, Н. Н. Пашков, Н. П. Розанов, А. М. Тужилкин // Сборник трудов МИСИ им. В. В. Куйбышева. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – № 32.
66. Мойс, П. П. Шахтные водосбросы / П. П. Мойс ; редактор О. Н. Тистрова ; технический редактор В. М. Скитина. — Москва : Энергия, 1975. — 144 с. — (Библиотека гидротехника и гидроэнергетики ; вып. 15). — 2500 экз.
67. Большаков, В.А. Справочник по гидравлике. Киев, «Вища школа», 1984, П. П., Розанов Н. П., Тужилкин, А. М. Гидравлические лабораторные исследования вариантов шахтного и траншейного водосбросов Чарвакского гидроузла: отчет по научно-исследовательской работе кафедры гидросооружений МИСИ им. В. В. Куйбышева. – М., 1957.
68. Морозов, А.А. Гидравлические режимы водосбросных сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 280 с.

69. Павловский, С. С. Нагрузки на конусный затвор / С. С. Павловский, А. Н. Румянцев // Гидротехническое строительство. – 1964. – № 11.
70. Пахомов, В. С. Шахтные водосбросы / В. С. Пахомов. – Москва: Энергия, 1971. – 160 с.: ил. – (Библиотека гидротехника и гидроэнергетика; вып. 12). – 3000 экз.
71. Пашков, Н. Н. Расчет гасителей шашечного типа за трубчатыми водосбросами / Н. Н. Пашков // Сборник трудов МИСИ им. В. В. Куйбышева. – М.: Госстройиздат, 1958. – № 24 (вып. I).
72. Перельман, Р. Г. Исследования явления воронкообразования / Р. Г. Перельман // Труды МАИ. – М.: Оборонгиз, 1954. – Вып. 38.
73. Плотиностроение в СССР // Гидротехническое строительство. – 1964. – № 4.
74. Поликовский, В. И. Исследования явления воронкообразования / В. П. Поликовский, Р. Г. Перельман // Труды МЭИ. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – Вып. 38.
75. Рекомендации по проектированию вакуумных водосбросов. – Л.: ВНИИГ, 1985. – 48 с.
76. Рекомендации по учёту кавитации при проектировании водосбросных гидротехнических сооружений. П 38-75. – Л.: Энергия, 1976. – 48 с.
77. Розанов, Н.П. Гидравлические расчёты водосбросных сооружений. – М.: Стройиздат, 1978. – 256 с.
78. Розанов, Н. П. Вопросы проектирования водопропускных сооружений, работающих в условиях вакуума и при больших скоростях потока. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1959.
79. Ролле, Н. Л. К вопросу о выборе типа входной воронки шахтного водосброса / Н. Л. Ролле // Труды Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина. – Л. – М.: Госэнергоиздат, 1950. – № 2.
80. Ролле, Н. Л. О коэффициенте расхода шахтных водосбросов / Н. Л. Ролле // Гидротехническое строительство. – 1949. – № 6.

81. Романько, Н. И. К расчету водосброса шахтного типа / Н. И. Романько // Гидротехническое строительство. – 1963. – № 4.
82. Романько, Н. И. Расчет шахтных водосбросов / Н. И. Романько // Гидравлика: межведомственный республиканский научно-технический сборник. – Киев: «Техніка», 1966. – № 2.
83. Севко, А. И. К расчету шахтных водосливов. – М.: Изд-е ВИА РККА, 1938.
84. Скрыга, В. Г. К гидравлическому расчету шахтных водосбросов / В. Г. Скрыга // Сборник трудов ХИСИ. – Харьков, 1958. – Вып. 10.
85. Слиский, С.М. Гидравлические расчёты высоконапорных гидротехнических сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
86. Соколовский, С. В. О гидравлическом расчете шахтного водосброса / С. В. Соколовский // Сборник трудов ОИСИ. – Одесса, 1959. – Вып. VIII.
87. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения. – М.: Минрегион России, 2012. – 40 с.
88. Теория турбулентности / Под ред. А.Н. Колмогорова. – М.: Наука, 1974. – 280 с.
89. Термодинамика водных растворов / Под ред. В.М. Глушкова. – М.: Химия, 1980. – 320 с.
90. Термодинамика необратимых процессов / Под ред. И. Пригожина. – М.: Наука, 1970. – 280 с.
91. Управление водосбросными сооружениями / Под ред. Ф.Г. Гунько. – Л.: Энергия, 1980. – 240 с.
92. Факторович, М. Э. Неравномерное движение жидкости в безнапорных призматических (цилиндрических) закрытых водоводах / М. Э. Факторович // Известия ВНИИГ. – 1947. – № 32.
93. Фокеев, В. С. Вихревые воронки и их применение на электростанциях. – М.: Энергия, 1964.
94. Фокеев, В. С. Некоторые свойства устойчивой вихревой воронки / В. С. Фокеев // Гидротехническое строительство. – 1951. – № 5.

95. Халпачьян, А. Х. К вопросу о методе измерения интенсивности водоворотов / А. Х. Халпачьян // Сборник трудов МИСИ им. В. В. Куйбышева. – М.: Госстройиздат, 1958. – № 24 (вып. 2).
96. Хютте. Справочник по гидравлике. – М.: ОНТИ, 1936. – 420 с.
97. Чугаев, Р.Р. Гидравлика. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
98. Чугаев, Р.Р. Гидравлические расчёты. – Л.: Энергия, 1976. – 352 с.
99. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
100. Binnie, A. M. Laboratory experiments on bellmouth spillways / A. M. Binnie, R. K. Wright // Journal of the Institution of Civil Engineers. – 1941. – V. 15, № 3; V. 16, № 8.
101. Bradley, J. N. Morning glory shaft spillways: prototype behavior / J. N. Bradley // Proceedings ASCE. – 1954. – V. 80, № 431.
102. Busc, I. F. Reflexions sur les vortex de vidage / I. F. Busc // La houille blanche. – 1955. – Vol. VIII, IX, № 4.
103. Creemp, E. S. Model Tests on the Bellmouth Spillways and Outfall of the Passideri Project / E. S. Creemp // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. – 1952. – V. 1, p. 11.
104. Dodge, E. R. Verification of urof inlet hydraulic model studies by field tests / E. R. Dodge // Civil Engineering N–T. – 1941. – V. 11, № 8.
105. Einstein, H. A., Huon L. Le vortex permanent dans un fluide (Steady vortex flow in a real fluid) / H. A. Einstein, L. Huon // La houille blanche. – 1955. – Vol. VIII, IX, V. 10, № 4.
106. Guryev, A. P. Theoretical Justification of the Operation of a Vacuum Shaft Energy Dissipator / A. P. Guryev, D. V. Kozlov, N. V. Khanov, D. A. Alekseyev // Power Technology and Engineering. – 2024. – Vol. 58, No. 4. – P. 571-579. – DOI 10.1007/s10749-025-01850-1. – EDN HFRHFU.
107. Kujundzic, B. Viscske brane u svetu / B. Kujundzic // Gradevinar. – 1966. – V. 18, № 11.

108. Kurtz, F. The hydraulic design of the shaft spillway for the Davis Bridge Dam and hydraulic festson working models / F. Kurtz // Trans. Am. Soc. Engrs. – 1924. – P. 1.

109. Livingstone, F. C. Design and construction of large dams / F. C. Livingstone // Consulting Engineer, USA. – 1964. – V. 23, № 4.

110. Rahm, L. Flow problems with report to intakes and tunnels of Swedish hydro-electric power plants / L. Rahm // Stockholm, Sweden, 1963. – № 71.

111. Rozanov, N. P., Moys, P. P., Pahkov, N. N., Vorobjev, G. A. Research of vacuum and cavitation characteristics of elements of hydrotechnical structures: Preprint. Internat. Assoc. Hydraul. Res. 11 th Internat. Congr. – 1965. – № 1/33.

ПРИЛОЖЕНИЕ

УТВЕРЖДАЮ:

Директор по научной деятельности
АО «Проектно-изыскательский и
научно-исследовательский институт
«Гидропроект» имени С.Я. Жука»,

к.т.н., профессор



Рубин О.Д.

СОГЛАСОВАНО:

Директор по развитию и управлению
проектами, ГИП Рогунской ГЭС
АО «Проектно-изыскательский и
научно-исследовательский институт
«Гидропроект» имени С.Я. Жука», к.т.н.

Юрьев С.В.

АКТ

о внедрении результатов научно-исследовательской работы

Алексеев Даниила Андреевич

Настоящий акт подтверждает внедрение результатов научно-исследовательской работы Алексеева Даниила Андреевича на тему: «Теоретическое и экспериментальное обоснование вакуумного шахтного гасителя энергии». Исследования проводились на кафедре Гидротехнических сооружений Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева.

Разработана, исследована и предложена к внедрению конструкция вакуумного шахтного гасителя энергии применительно к задачам пропуска сбросного расхода Рогунской ГЭС с напором 300 метров. Гидравлические исследования модели показали эффективность работы заявляемого устройства гашения энергии. Предложенное сооружение для гашения энергии потока может быть использовано в составе водосбросных сооружений проектируемых гидроузлов.

Основные положения исследований, представленные в диссертационной работе Алексеева Даниила Андреевича, доказали свою эффективность на модельных испытаниях в ходе проектирования Рогунской ГЭС. Результаты исследования и расчётные зависимости были использованы при проектной вариантной проработке конструкций гасителей энергии потока водосбросных сооружений.

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ – МСХА
имени К.А.ТИМИРЯЗЕВА»**

(ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева)

Тимирязевская ул., д. 49, Москва, 127550

Тел.: (499) 9760480 Факс: (499) 9760428

E-mail: info@timacad.ru http://www.timacad.ru

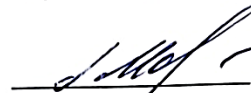
ОКПО 00492931, ОГРН 1037739630697

ИНН/КПП 7713080682/771301001

15.10.2026 № 02-15/1838
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Профессор кафедры декоративного
садоводства и газоноведения,
выполняющий работу проректора по
научной работе, д.с.-х.н., доцент

 С.С. Макаров
«15» 10 2026 г.

СПРАВКА

об использовании результатов научно-исследовательской работы (внедрении) в
учебном процессе

Дана аспиранту кафедры гидротехнических сооружений **Алексееву Даниилу Андреевичу** в том, что разработанная им методика экспериментальных исследований и конструкция вакуумного шахтного гасителя энергии решает задачу повышения надёжности работы энергогасящих сооружений и снижения затрат на их возведение, внедрена в учебный процесс и используется для студентов: направления подготовки 08.03.01 «Строительство», направленности «Гидротехническое строительство» в лекционном курсе и практических занятиях дисциплины Б1.В.18 «Основы безопасности гидросооружений»; направления подготовки 08.04.01 «Строительство», направленности «Речные и подземные гидротехнические сооружения» в лекционном курсе и практических занятиях дисциплины Б1.В.01 «Речные гидроузлы и гидротехнические сооружения».

И.о. директора института мелиорации,
водного хозяйства и строительства
имени А.Н. Костякова, к.т.н., доцент



Д.М. Бенин

Заведующий кафедрой гидротехнических
сооружений, д.т.н., профессор



Н.В. Ханов