

На правах рукописи

АЛЕКСЕЕВ ДАНИИЛ АНДРЕЕВИЧ

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

Специальность 2.1.6 – Гидротехническое строительство, гидравлика и
инженерная гидрология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре гидротехнических сооружений ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

Научный руководитель: **Ханов Нартмир Владимирович**,
доктор технических наук, профессор, профессор
РАН, заведующий кафедрой гидротехнических
сооружений ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени
К.А. Тимирязева

Официальные оппоненты: **Баев Олег Андреевич**,
доктор технических наук, доцент, начальник
гидротехнического отдела ФГБНУ «Российский
научно-исследовательский институт проблем
мелиорации»
Скляднєв Михаил Константинович,
кандидат технических наук, старший
преподаватель кафедры гидравлики и
гидротехнического строительства ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет»

Ведущая организация: ФГБНУ «Федеральный научный центр
гидротехники и мелиорации имени А.Н.
Костякова»

Защита диссертации состоится «22» декабря 2026 г. в 13:30 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.07 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д.19, учебный корпус № 28, аудитория 201, тел: 8(499)976–17–14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.030.07
кандидат технических наук, доцент

Н.Б. Мартынова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. В современных крупных высоконапорных и средненапорных гидроузлах (с напорами больше 50 метров) стоимость энергогасящих сооружений достигает 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 задачи 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 задача повышения надёжности работы энергогасящих элементов водосбросных сооружений, что, вкуче 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. Розанова, А.Л. Зуйков, 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 уделялось 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 исследований. 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, устраиваемом 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 позволят 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. Гашение 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; в выборе направления исследования и формулировании проблемы; в определении цели и задач работы; в разработке методики исследований; в организации и проведении лабораторных опытов и обработке экспериментальных данных; в апробации результатов исследований на международных и всероссийских научно-практических конференциях; в 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 результатов. 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 работы. Основные положения и результаты исследований докладывались на заседаниях кафедры гидротехнических сооружений РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, а также на научных конференциях и семинарах: в НИУ МГСУ, Москва, 24 мая 2023 г.; в РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, 2024, 2025, 2026 годы; в КБГАУ имени В.М. Кокова, Нальчик, 05 июня 2026 г.

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

Структура и объем 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, обозначена научная новизна, описана теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследований, обоснована степень достоверности результатов, приведены результаты апробации, структура и объём работы.

В первой главе представлен анализ научных работ, который показал, что задачу преобразования избыточной кинетической энергии выполняют традиционно специальные устройства - гасители энергии. В мировой гидротехнической практике накоплен обширный опыт проектирования таких устройств, однако ни одно из известных решений не является универсальным. Систематизация существующих подходов к гашению энергии в шахтных водосбросах, анализ их положительных и отрицательных сторон, предварительные расчеты растворимости воздуха в воде в зависимости от температуры и давления, поведения струи воды в условиях вакуума, дало возможность осознать, что вакуумный шахтный гаситель энергии представляет собой качественно новый этап развития технологии гашения энергии, обладающий решающими преимуществами перед известными конструкциями.

В главе обоснована необходимость исследования на экспериментальной площадке вакуумного шахтного гасителя энергии, основанного на принципах изоляции ствола шахты от атмосферного воздуха и обеспечении напорного режима течения посредством горизонтальных затворов, использования физического потенциала вакуума для стабилизации потока.

Во второй главе рассмотрено обоснование выбора и гидравлическая концепция устройства гашения энергии для условий Рогунской ГЭС, применительно к специфике, эксплуатации которой сформулирован комплекс требований к проектируемому устройству гасителя. Формирование воздушных пробок является недостатком туннелей с положительным уклоном, воздух

аккумулируется под шельгой свода. Применение обратного уклона нивелирует указанный недостаток, обеспечивая транспортировку выделившегося воздуха транзитным потоком и гарантируя квазистационарность течения во всем диапазоне эксплуатационных расходов. Отрицательный уклон гарантирует стабильную работу сооружения в широком диапазоне расходов, включая минимальные значения. При этом необходимо учитывать гидравлическую особенность напорных водоводов круглого поперечного сечения - достижение максимального удельного расхода реализуется при степени наполнения $h/d < 1$. Представлена расчетная зависимость относительной пропускной способности водовода круглого сечения.

Гидравлический режим, который будет устанавливаться в туннеле, зависит от уклона дна и расхода. Форма кривой свободной поверхности потока зависит от отношения между принятым уклоном дна туннеля i и критическим уклоном $i_{кр}$. Следовательно, для анализа возможных режимов движения воды в отводящем туннеле, прежде всего, необходимо определить величины критических глубин $h_{кр}$ и критических уклонов $i_{кр}$. Приведены расчетные графики изменения критических расходов 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 относительной глубины наполнения h/d (рис. 1, а). Зависимость критического уклона от расхода и диаметра туннеля показана на рис. 1, б. Как видно по графикам этих кривых, минимальный критический уклон для отводящего туннеля составляет $i_{кр. мин.} = 0,0022$.

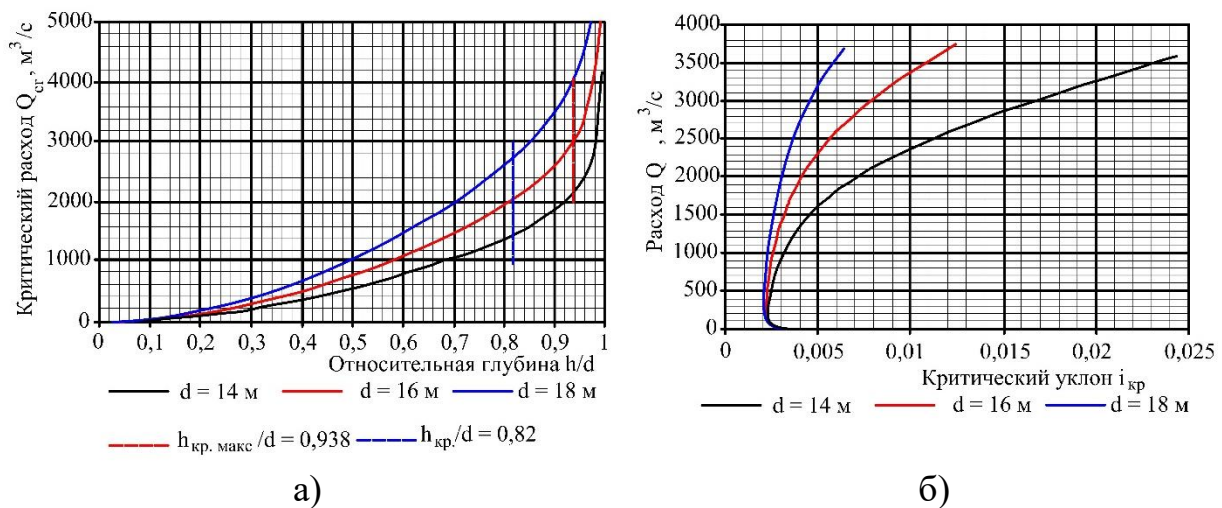


Рисунок 1 - Расчетные графики зависимости: а – критического расхода от относительной глубины воды в туннеле; б – критического уклона от расхода и диаметра туннеля

Как видно по графикам этих кривых, при уклонах дна отводящего туннеля менее $i < 0,0022$ при всех расходах установится кривая спада с минимальной глубиной, равной критической, в выходном сечении туннеля.

Одновременно, при решении вопроса о назначении диаметра туннеля, необходимо учитывать дополнительно еще два обстоятельства, что увеличение скорости потока на выходе из туннеля затрудняет условия его растекания в нижнем бьефе и что увеличение уклона туннеля и скорости в нем влечет за

собой необходимость повышения качества бетонной обделки с целью недопущения кавитационного и механического разрушения обделки.

Анализируя соотношения между классами и марками бетона по прочности при нормативном коэффициенте вариации $v = 13,5\%$, для обеспечения кавитационной стойкости бетон обделки должен выполняться из бетона класса В30.

Анализ работы туннеля упрощается при использовании кривых свободной поверхности, они позволяют определить границы, при которых безнапорный режим движения воды переходит в напорный режим движения.

По методике В.И.Чарномского 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 $Q=3500\text{ м}^3/\text{с}$. 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 $Q=1600\text{ м}^3/\text{с}$.

Принципиальная идея работы вакуумного шахтного гасителя энергии 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.

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

В условиях свободного падения струй внутри шахты площадь контакта увеличивается экспоненциально, что приводит к почти мгновенному достижению равновесия по сравнению со спокойным состоянием водоема. В вакуумном шахтном гасителе энергии поток тормозится плавно, распределяясь по периметру шахты восходящими токами, гидростатический столб выступает в роли демпфера.

Взаимосвязь гидростатического давления и температуры определяет физическое объяснение поведения жидкости в вакууме. 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. Проектирование вакуумного шахтного гасителя энергии требует строгого учета этих эффектов и инженерным ответом является принципиальная схема с изоляцией от атмосферы, напорным подводом и обратным уклоном отводящего тракта.

Одним из возможных путей уменьшения стоимости водосбросного сооружения и повышения безопасности работы гидроузла является уменьшение энергии сбрасываемого потока на выходе за счёт частичного гашения энергии сбрасываемого потока по пути его движения. 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, а. По существу, предложенный шахтный водосброс представляет развитие конструкции традиционного шахтного водосброса, в дальнейшем эта конструкция с некоторыми модификациями вошла в нормативный документ. Однако, каких-либо рекомендаций по проектированию и гидравлическому расчёту в литературе не имеется.

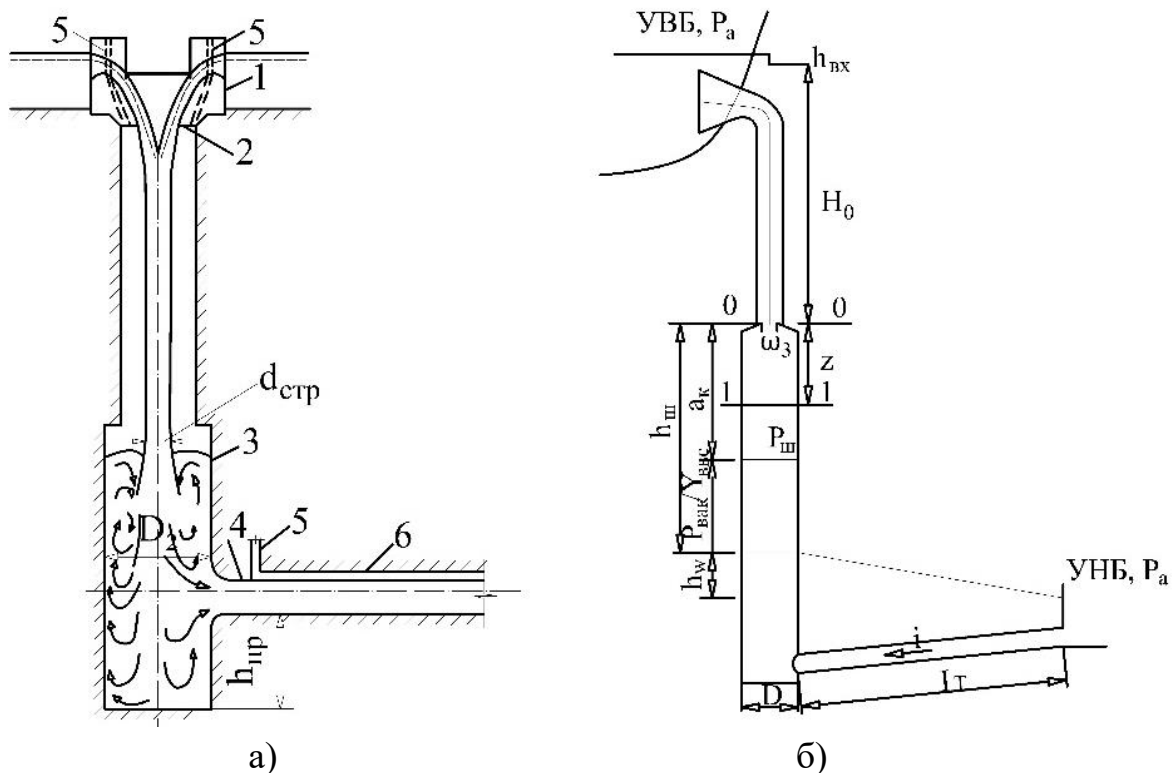


Рисунок 2 - Шахтный водосброс: а - с цилиндрическим шахтным гасителем энергии потока: 1 - кольцевая воронка; 2 - уступ для подвода воздуха; 3 – цилиндрический (шахтный) гаситель энергии; 4 – забральная стенка; 5-воздуховоды; 6- отводящий тракт; б - схема продольного разреза предлагаемого водосбросного тракта с использованием вакуума в технологии гашения энергии

Продольный разрез принципиальной схемы водосбросного тракта с вакуумной шахтой приведен на рисунке 2, б. 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 его конце (рис. 2, б).

Вакуум в шахте создаётся заземлением воздуха и выносом его в отводящий водовод падающим из затвора потоком. При уровне воды в шахте

выше входного отверстия отводящего туннеля, вынос воздуха будет сопровождаться сначала появлением вакуума в шахте, а затем углубления вакуума до абсолютного значения, определяемого высотным положением шахты в натуральных условиях.

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 щель 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 определяются следующими законами: 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.

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 $V_{\text{вод}}$ может быть определено в соответствии с законом Генри:

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

где $C_o = f(t)$ - коэффициент пропорциональности, называемый константой Генри, равный растворимости газа при атмосферном давлении и данной температуре воды; P_i - парциальное давление газа, для которого определяется концентрация его растворения в жидкости; P_o - парциальное давление газа, при котором определён коэффициент Генри.

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

$$V_p \cdot P_o = V_i \cdot P_i, \quad (2)$$

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:

$$V_{\text{воз}} = C_o \cdot V_{\text{вод}} \cdot \left(1 - \frac{P_i}{P_o}\right) \cdot \frac{P_o}{P_i}. \quad (3)$$

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.

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 с последующим падением по всей высоте ствола шахты. 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 поправку на вакуум:

$$Q = \varphi \cdot \varepsilon \cdot \omega_3 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_o + p_{ш} + h_w)}, \quad (4)$$

где φ — коэффициент скорости, ε — коэффициент сжатия струи; ω_3 — площадь открытия затворов, H_o — напор над выходным сечением затвора, $p_{ш}$ — давление в шахте, h_w — гидравлические потери в отводящем водоводе.

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

В третьей главе описываются экспериментальная установка, методика проведения исследований, используемые оборудование и измерительные приборы.

Эксперименты проводились на физической модели в лаборатории водопропускных сооружений кафедры гидротехнических сооружений Российского государственного аграрного университета - МСХА имени К.А. Тимирязева (рис. 3).

Модель выполнена в масштабе 1:100 от натурной величины водосброса №3 Рогунского гидроузла. Модель изготовлена из органического стекла 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 диаметром 200 мм (исследовался и вариант шахты с колодцем); отводящий туннель диаметром 140 мм (исследовался и туннель с диафрагмой, установленной в его начале); воздухосборника прямоугольного поперечного сечения 10x10 мм, который соединялся с туннелем перфорацией в виде отверстий диаметром 6 мм, установленных через 600 мм; распределительной стенки в конце туннеля; отводящего лотка.

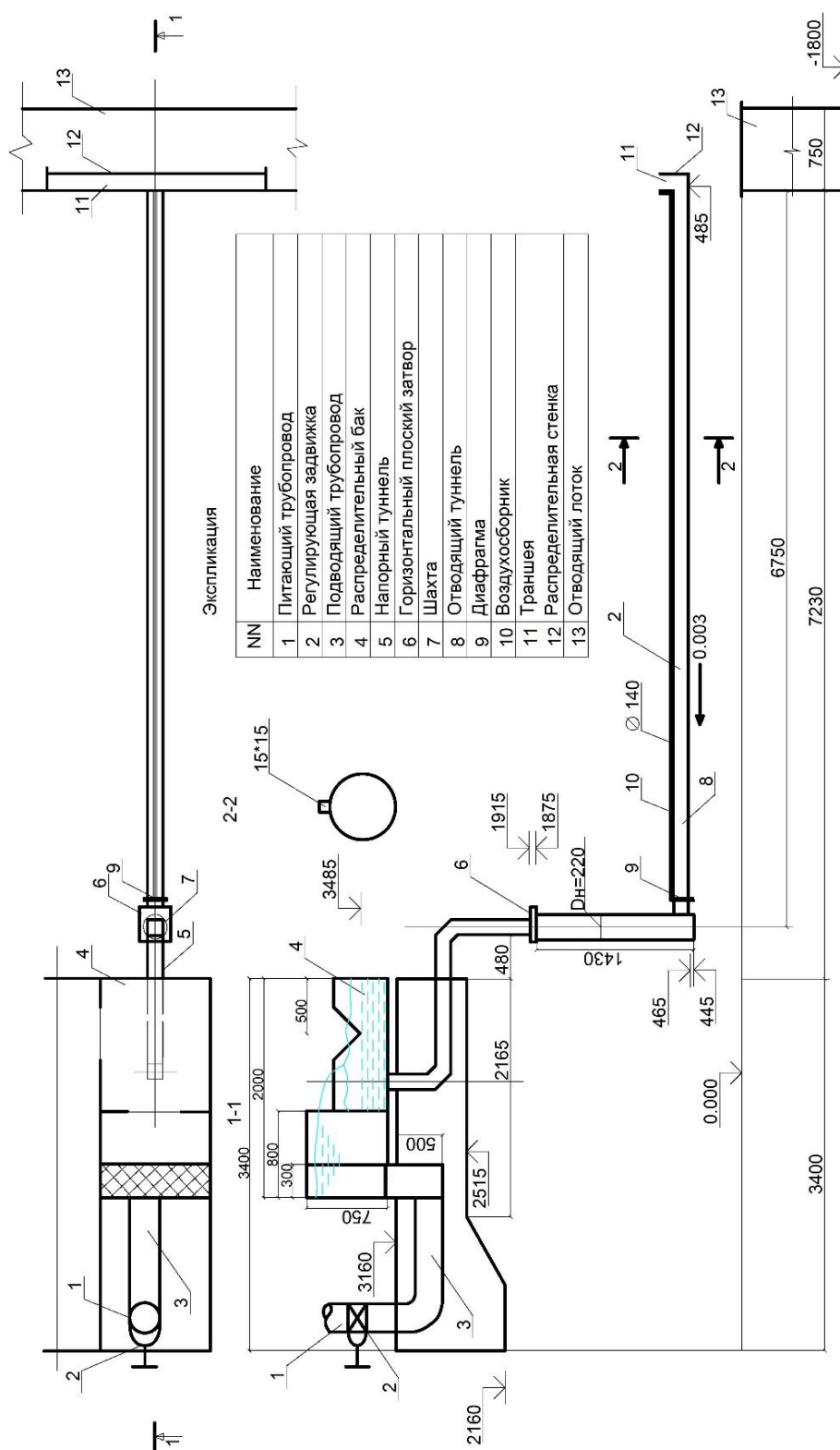


Рисунок 3 - Принципиальная схема модельной установки

Для обеспечения корректного переноса результатов модельных испытаний на натуру необходимо соблюдение критериев гидродинамического подобия. Моделирование выполнялось по числу Фруда при автомодельности по числу Рейнольдса, при соблюдении условия $Fr_m = Fr_n$ (индексы m - модель, n - натура). Число Фруда в шахте с $d=20$ м изменялось $Fr=v^2/gd=0,14...0,45$ в

диапазоне расходов $Q=630-2030 \text{ м}^3/\text{с}$; в сечении за затворной камерой: круглого сечения по параметрам струи $Fr=4,5...14,62$; с затворами прямоугольного сечения - $Fr=1,5...4,83$; на выходе из туннеля при $Q_{\text{расч}}=1800 \text{ м}^3/\text{с}$ $Fr=0,997$. Фото общего вида модельной установки представлено на рисунке 4.



Рисунок 4 - Общий вид модельной установки (фото)

Для исследования влияния аэрации на гидродинамику потока реализована независимая система подачи воздуха в ствол шахты. Воздух подавался через отверстие, расположенное в начале шахты под затворной камерой. Расход воздуха контролировался счетчиком высокой точности (класс 1.0) и варьировался независимо от расхода воды, что позволял исследовать влияние объёмного содержания воздуха на динамику потока.

Для определения принципиальной работоспособности разработанного технического решения на первом этапе была принята упрощённая конструкция затворной камеры с круглым отверстием (рис. 5, а). Для дальнейших исследований разработана конструкция затворной камеры с двумя затворами с острой кромкой, позволяющая более точно моделировать условия реального сооружения (рис. 5, б).



а)



б)

Рисунок 5 - Фото конструкции затворной камеры: а - с круглым отверстием; б - с двумя прямоугольными затворами

Для изучения распределения гидродинамического давления по стенкам элементов модели использовалось пьезометрирование. Пьезометров было установлено: на подводящем участке напорного туннеля – 3 шт., на стволе шахты – 7 шт., на отводящем туннеле – 15 шт. (рис. 6).

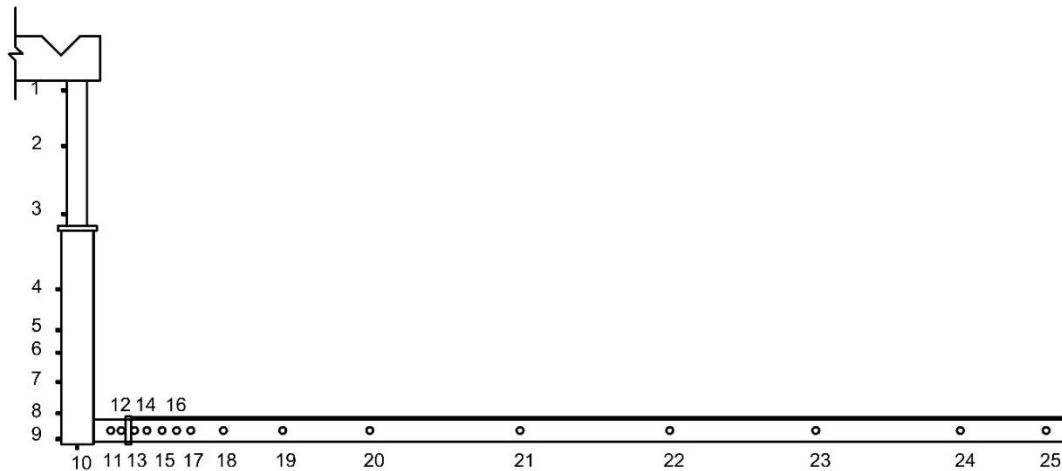


Рисунок 6 - Схема размещения пьезометров на модели шахтного водосброса

Экспериментальные исследования проводились в несколько этапов: пробные испытания - определение фактических расходов воды и воздуха, проверка герметичности системы и работоспособности измерительной аппаратуры; основные опыты - проведение замеров при различных фиксированных расходах воды и расходах воздуха с варьированием степени открытия затворов; контрольные опыты - повторение измерений для оценки результатов. Для каждого режимного параметра проводилось не менее трёх независимых измерений с последующим усреднением.

Обработка результатов экспериментов включала следующие этапы: перевод показаний пьезометров в значения напора, пересчет в безразмерные коэффициенты; построение эпюр распределения давления вдоль ствола шахты и отводящего туннеля для каждого исследованного режима; оценка погрешности измерений.

Конструктивные особенности предложенного технического решения заключаются в следующем: гашение энергии пропускаемых потоков выполняется в вертикальной шахте; регулирование расходов выполняется горизонтальными затворами; отводящий туннель размещается в нижней части шахты и выполняется с обратным уклоном; при необходимости шахта может быть продлена цилиндрическим гасителем; для выпуска воздуха из отводящего туннеля над его шельгой устанавливается воздуховод; использование устройства гашения энергии 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 $Q=1800$ м³/с, диаметр шахты $D_{ш}=20,0$ м и диаметр отводящего туннеля $d_t=14,0$ м. В этом случае максимальная скорость в туннеле составит $V_{\text{макс}}=11,7$ м/с, что при его работе полным сечением обеспечивает на выходе из туннеля число Фруда:

$$Fr = \frac{V^2}{gd} = \frac{11.7^2}{9.81 \cdot 14} = 0.997 = 1 \quad (5)$$

Погрешность измерений определялась как сумма систематической и случайной составляющих. Систематическая погрешность пьезометрических измерений оценивалась на основе паспортных данных измерительных приборов (цена деления шкалы – 0,5 мм, погрешность расходомера - 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 3,0 %.

В четвертой главе представлены результаты гидравлических исследований вакуумного шахтного гасителя энергии потока в закрытом водосбросе, оборудованного механическими затворами, целью которых была оценка влияния различных конструктивных решений на параметры потока и обеспечения его устойчивости в водоотводящем тракте.

Первый этап исследований включал тестовые испытания модели. Исследования шахтного гасителя проведены при пропуске расхода $Q=200...2500 \text{ м}^3/\text{с}$. В туннеле с уклоном $i=-0,0045$ отсутствуют воздушные мешки. В воздушной трубе происходит спокойное движение воздуха, который полностью выделяется из потока. На выходе из отводящего 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.

Исследования работы шахтного гасителя с круглой затворной камерой показали удовлетворительную работу во всём диапазоне расходов, включая форсированные расходы, значительно превосходящие расчётный расход.

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 5, б, а сопрягающий участок был оборудован в створе выходного сечения участка предварительного расширения прорезной стенкой.

Была проведена серия экспериментов при маневрировании затворами. 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. Как показали предварительные исследования работы шахтного гасителя энергии потока, при использовании затвора с острой кромкой, в принятой к исследованиям конструкции затворной камеры, при обтекании кромки 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 $a/a_0=0,25$.

На рис. 7 представлены расходные характеристики затворной камеры при пропуске расходов с подачей воздуха в шахту 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 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.

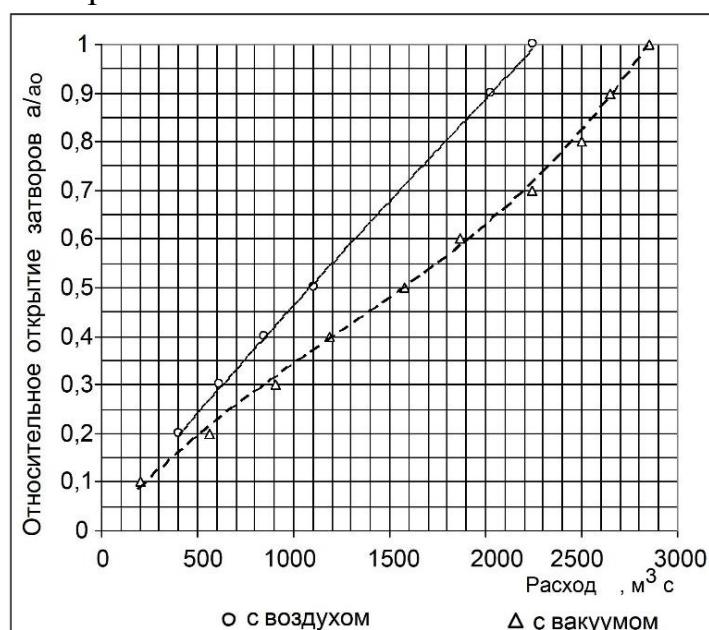


Рисунок 7 - Расходные характеристики затворной камеры с затворами со скругленными кромками

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, 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.

В процессе экспериментов было установлено, что при свободной подаче

воздуха вакуум на модели в шахте гашения энергии достигал $h_{\text{вак}}=0,3$ м при расходе затворной камеры 22,25 л/с, чему соответствует расчётный расход воздуха $Q_a=19,5*0,3^{1/2}=11$ 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 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.

Изучение работы затворной камеры со скруглённой кромкой затворов позволило установить, что растекание потока за затвором улучшилось, но тем не менее в диапазоне открытий затворов $a/a_0=0,3\dots0,8$ 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 м³/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.

На фото рис. 8 приведены результаты исследований характера движения струй за затворами с установкой дефлекторов. 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. Причиной этого явления служит рассогласование между напором, необходимым для пропуска пониженных расходов воды, и глубиной воды в шахте, необходимой для гашения увеличивающейся энергии потока.

Выполнен расчёт величины 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 расхода туннеля. После этого глубина воды в туннеле снова увеличивается, уменьшая расход, что приводит к возникновению в туннеле волнового характера движения воды.

Учитывая это обстоятельство, была исследована модель шахты с колодцем, расположенным ниже дна входного сечения туннеля на 70 м. Фото модели этого варианта водосброса приведена на рис. 9, а.

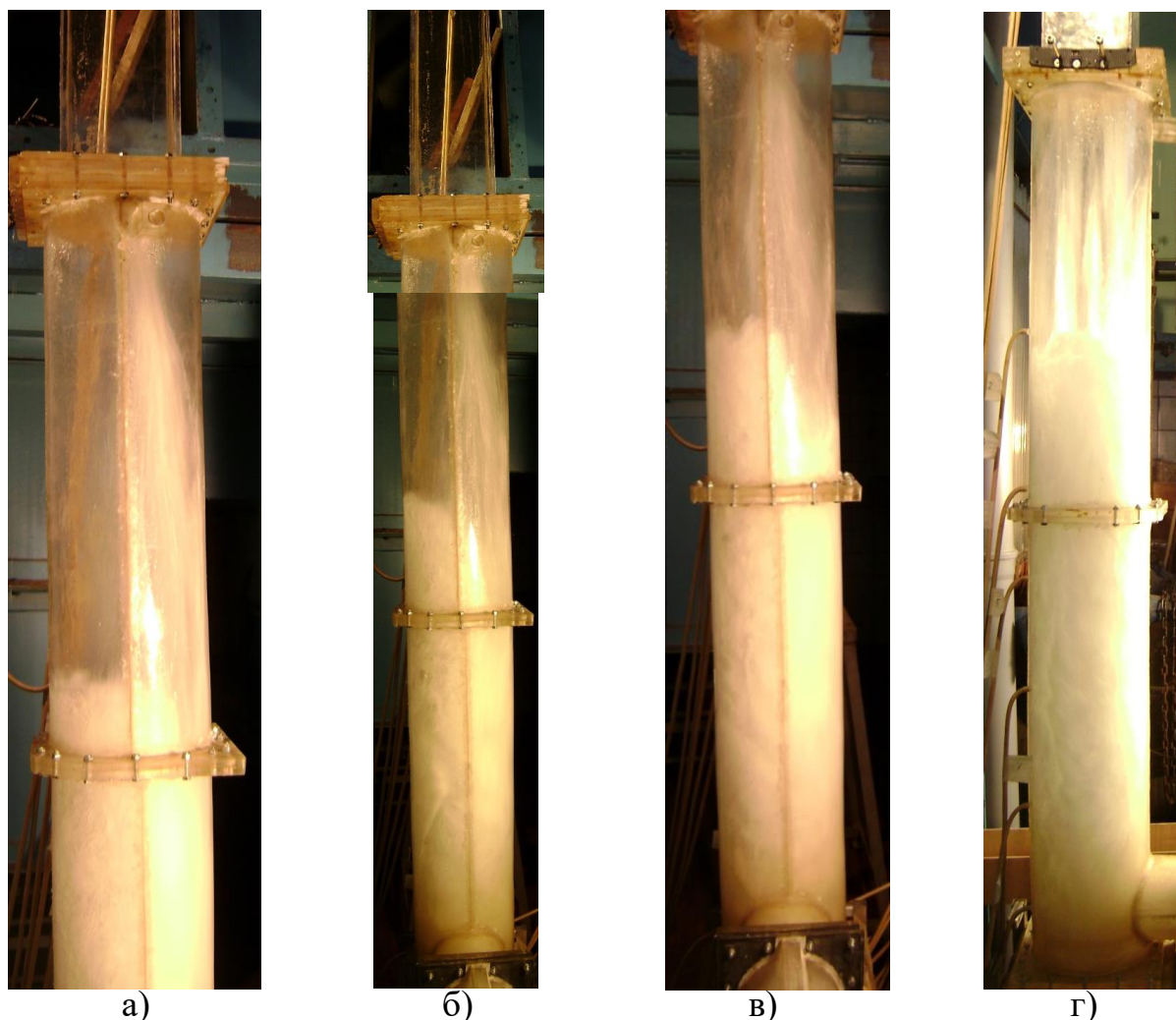


Рисунок 8 - Картина движения воды в шахте за затворами с дефлекторами при подаче воздуха: а - $Q=1680 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=0,7$; б - $Q=1980 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=0,8$; в - $Q=2200 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=0,9$; г - $Q=2300 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=1,0$

Для этого варианта конструкции шахтного водосброса была проведена серия экспериментов с затворной камерой со скруглёнными кромками и с дефлекторами с подачей воздуха в шахту в количестве около 2% от расхода воздуха в соответствии с теоретическими расчётами, приведёнными выше. На рис. 9, а и б приведены соответствующие фото картин движения воды для открытия затворов $a/a_0=1,0$ при дозированной подаче воздуха в шахту.

В работе представлены результаты расчётов осреднённого гидродинамического давления по высоте шахты при впуске воздуха 2% от расхода для конструкции водосброса с диафрагмой на входе в отводящий туннель и при свободном входе. Анализ этих графиков позволяет установить, что в напорном верхнем участке туннеля в обоих вариантах отводящего туннеля при всех расходах устанавливается гидростатическое распределение давлений. Сопоставляя значения этих напоров для входа с диафрагмой и свободным входом, видно, что в диапазоне расходов от $Q=140...3200 \text{ м}^3/\text{с}$ напоры на входе с диафрагмой на 15...40 м больше, чем при свободном входе. Это увеличение напора соответствует гидравлическим потерям в диафрагме (рис. 3). Соответственно, пьезометрические уровни в шахте будут выше для конструкции входа с диафрагмой.

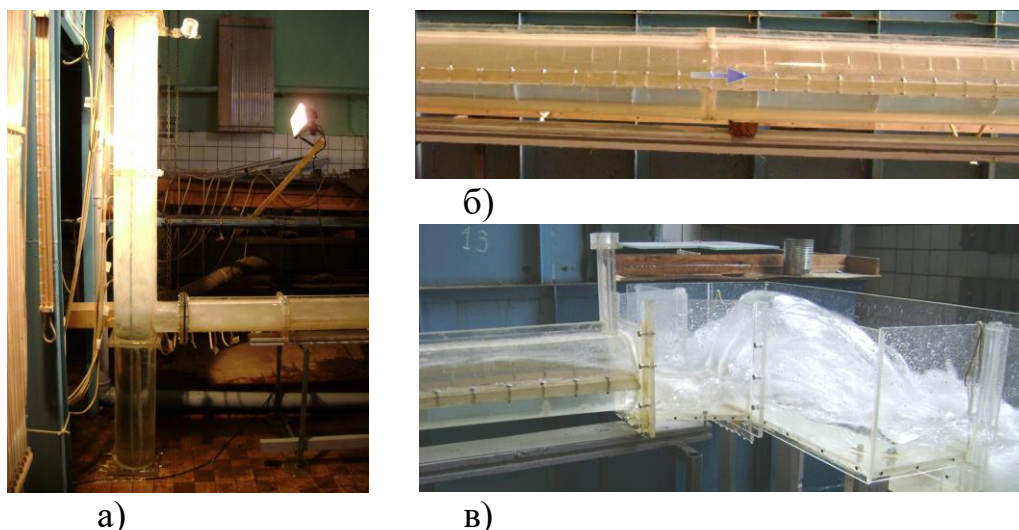


Рисунок 9 - Картина движения воды при подаче воздуха $Q_a=67 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q=3130 \text{ м}^3/\text{с}$, $a/a_0=1$: а - в зоне примыкания отводящего туннеля к шахте; б - в отводящем туннеле; в - в сопрягающем сооружении на выходе из туннеля

На рис. 10 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.

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 уменьшится.

В ходе исследований изучено распределение давления по длине отводящего туннеля. На рисунке 11 представлены результаты распределения осреднённого гидродинамического давления по длине отводящего туннеля при впуске воздуха 2% от расхода воды для конструкции водосброса с диафрагмой на входе в отводящий туннель, а на рисунке 12 - то же при свободном входе.

Анализ этих графиков позволяет установить, что на начальном участке туннеля в обоих вариантах конструкции входа в отводящий туннель при всех расходах устанавливается режим с идентичным распределением 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.

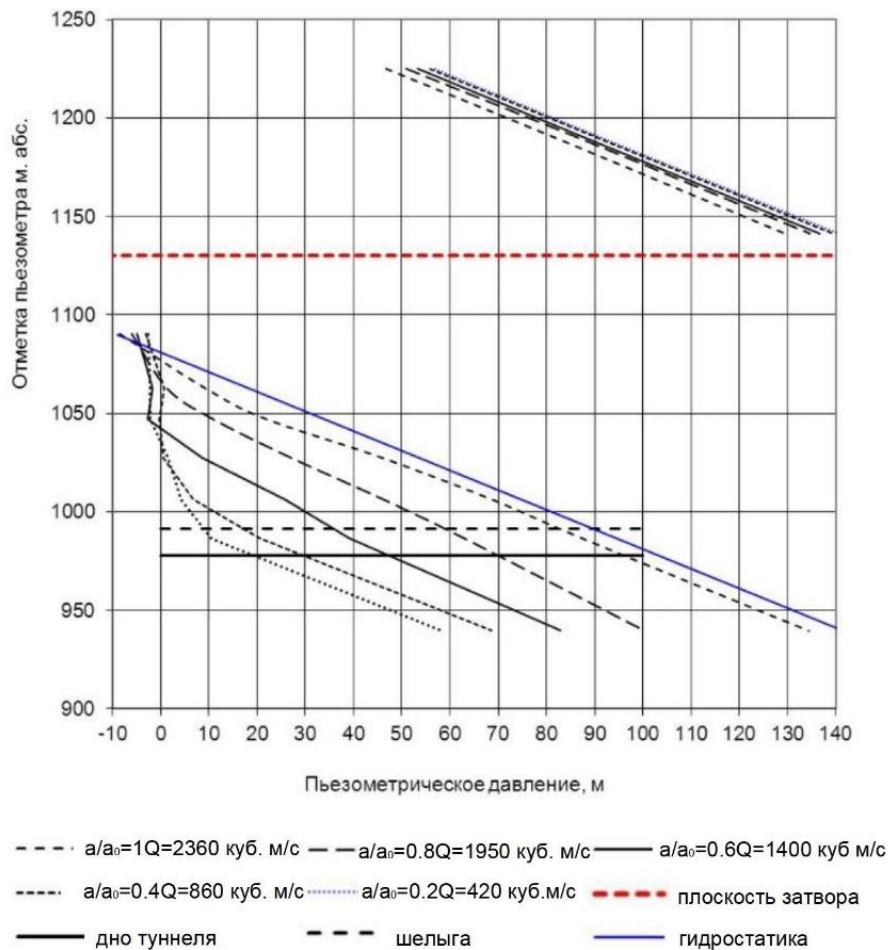


Рисунок 10 - Скорректированное распределение осреднённого гидродинамического давления по высоте шахты при впуске воздуха 2% от расхода водосброса и при наличии диафрагмы

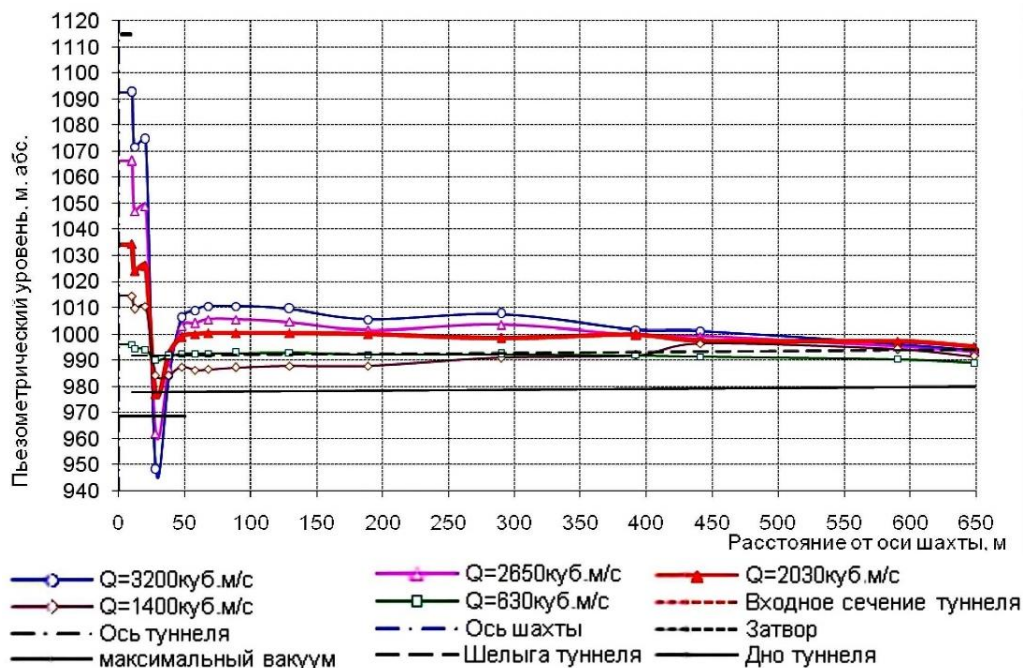


Рисунок 11 - Распределение осреднённого гидродинамического давления по длине отводящего туннеля при наличии диафрагмы на входе

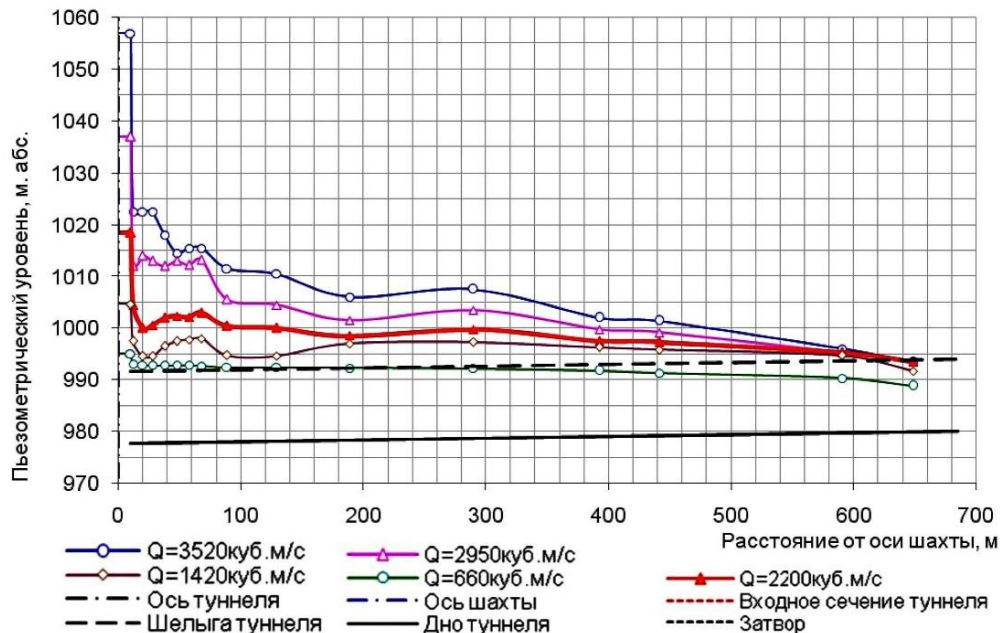


Рисунок 12 - Распределение осреднённого гидродинамического давления по длине отводящего туннеля при отсутствии диафрагмы на входе

Целью установки диафрагмы было желание уменьшить 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. 11, за счёт восстановления энергии потока за диафрагмой происходит снижение давления с образованием глубокого вакуума при расходах более $1800 \text{ м}^3/\text{с}$. Так что следует признать, что установка диафрагмы в отводящем туннеле нецелесообразна. Устранение диафрагмы в туннеле и обеспечение свободного входа потока делает распределение осреднённого гидродинамического давления равномерным и приемлемым по длине шахты.

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 уделялось 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 $6.0 \times 4.0 \text{ м}$ 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 позволило установить, что в диапазоне открытий затворов $a/a_0 = 0.3 \dots 0.8$ 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 $h_{\text{вак}}=0,3 \text{ м}$ 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. 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 был размером 1х1 м, диаметр отверстий 0.6 м, с шагом 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 за туннелем 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 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 его входным сечением. Для этого была исследована модель шахты с колодцем, расположенным ниже дна входного сечения туннеля на 70 м, с затворной камерой со скруглёнными 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 $a/a_0=0,1$ до $Q_a=67 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q=3130 \text{ м}^3/\text{с}$, при $a/a_0=1$.

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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ:

1. 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.

2. 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 RQKAХС.

3. Алексеев, Д.А. Распределение гидродинамического давления в проточном тракте шахтного водосброса 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. – DOI: 10.32962/0235-2524-2026-9-12.

Публикации в сборниках материалов конференций и других изданиях:

4. 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.

5. Алексеев, Д.А. Расчёт расходной характеристики водовода круглого поперечного сечения при равномерном режиме течения жидкости / Д.А. Алексеев // Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 150-летию со дня рождения А. Я. Миловича: сборник статей. – Москва, 2024. – Том 1. – С. 132-136.

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 HOJMIЛ.

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. 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.