

На правах рукописи

АЛСАДЕК ЕЛИАС САДЕК

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

Специальность 2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и
инженерная гидрология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва, 2025 г.

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, начальник
Гидротехнического отдела ФГБНУ «Российский
научно-исследовательский институт проблем
мелиорации»
Юрченко Александр Николаевич,
кандидат технических наук, доцент, доцент
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 состоится 11 марта 2025 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 35.2.030.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет–МСХА имени К.А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, 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 «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.030.07
кандидат технических наук, доцент

Н.Б. Мартынова

Общая характеристика работы

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

В современной практике гидротехнического строительства для стабилизации нижнего бьефа и обеспечения безопасного и надежного отвода сбрасываемых потоков в каналы или русла рек применяются различные устройства, предназначенные для гашения энергии. Использование таких конструкций в мировой гидротехнике признается одним из наиболее эффективных методов борьбы с формированием локальных размывов грунта, возникающих за сооружениями. Рассматриваемые в данной работе типы гасителей энергии находят применение в ситуациях, когда нижний бьеф водопропускных сооружений функционирует продолжительное время при минимальных параметрах водного потока в отводящем водотоке или вообще при отсутствии воды в нижнем бьефе в засушливые периоды. Параметры концевых устройств водосбросов с системами для гашения энергии, несмотря на их широкое применение в условиях сухого климата и низкой водности, требуют более глубокого анализа. Для повышения эффективности гашения энергии и сохранения устойчивости гидравлического режима при изменении гидрологических условий необходимы дополнительные исследования. Таким образом, акцент на эти аспекты является крайне важным для усовершенствования конструкции водопропускных систем, что в свою очередь позволит повысить их надежность и безопасность, а также снизить риск негативного воздействия на окружающую инфраструктуру.

Степень разработанности темы исследования. Анализ функционирования нижнего бьефа трубчатых водовыпускных сооружений и проблемы их усовершенствования представляют собой важные и сложные аспекты в области проектирования конструкций гидротехнических сооружений. Эти сооружения требуют детального изучения, что было инициировано рядом научных исследований, проведенных такими учеными, как Н.П. Розанов, Н.Н. Пашков, Н.Т. Кавешников, И.С. Румянцев, О.Н. Черных, А.П. Гурьев, П.К. Цветков, И.Л. Розовский, Ф.Г. Гунько, Н.Н. Беляшевский, И.И. Калантыренко, И.И. Леви, Н.А. Вознесенский и зарубежными авторами L. Philip, E.A. Elevatorski, J.R. Fiala, L.A. Maurice, V.T. Chou и другими исследователями. В их работах рассматриваются различные подходы к решению вопросов, связанных с эффективностью работы нижнего бьефа и

предотвращением возможных нарушений в потоках, что свидетельствует о значимости данных исследований для дальнейшего развития гидротехнической отрасли.

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

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

Для достижения этой цели автором были поставлены следующие задачи:

- выполнить обзор научно-технической литературы с целью изучения существующих энергогасящих устройств нижнего бьефа и гидравлических условий их работы;
- провести теоретические исследования деформации русла за водосбросными сооружениями, работающими в нерегулируемом режиме;
- построить физическую модель выходного участка сопряжения в нижнем бьефе за закрытым водосбросным сооружением для исследования вариантов энергогасящих устройств на нём и провести экспериментальные исследования;
- установить параметры энергогасящих устройств, обеспечивающих безопасную эксплуатацию нижнего бьефа и водосбросного сооружения в течение нормативного срока службы.

Научная новизна исследования. В настоящее время для контроля деформаций русла реки за водосбросными сооружениями необходимо определить размеры и оптимальную высоту положения энергогасящих устройств, при которых достигаются допустимые скорости на рисберме и в отводящем участке, не превышающие значения скоростей, вызывающих эрозию и размыв грунтов нижнего бьефа.

На основании полученных данных разработаны рекомендации по оптимизации энергогасящих устройств в деформируемых руслах, что позволяет повысить эффективность работы и долговечность участка сопряжения за расширяющимся водобоем и снизить риск размыва русла за креплением нижнего бьефа при реконструкции и ремонте фрагментов водопропускного тракта.

Экспериментальные исследования: Проведены оригинальные экспериментальные исследования, которые подтвердили теоретические предположения и выводы. Эксперименты включали в себя тестирование разных схем комплексных энергогасящих устройств при различных граничных гидравлических условиях.

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

Методология и методы научного исследования. Были исследованы гидравлические параметры потока при наличии энергогасящих устройств нижнего бьефа в виде расширяющегося водобойного колодца без установки гасителей энергии и при их наличии, и влияние этих гасителей на диссипацию энергии воды в нижнем бьефе после рисбермы, где скорости оказались меньше допустимых и не вызывают деформаций в русле.

Положения, выносимые на защиту:

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

Степень достоверности и апробация результатов работы. При проведении лабораторных опытов использовались современные оборудование и приборы, хорошо известные в гидротехнике. Обработка полученных опытных данных проводилась с помощью известных программных комплексов (в основном Microsoft Excel 2010 и AutoCAD 2020).

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

- Всероссийская с международным участием научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 155-летию со дня рождения Н.Н. Худякова. Москва, РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, 7-9 июня 2021 г.;
- Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 135-летию со дня рождения А.Н. Костякова. Москва, РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, 6-8 июня 2022 г.;
- V Всероссийский научно-практический семинар «Современные проблемы гидравлики и

гидротехнического строительства». Москва, НИУ МГСУ, 2022 г.; VI Всероссийский научно-практический семинар «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства». Москва, НИУ МГСУ, 2023 г.; XIV Национальная конференция с международным участием «Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения». Саратов, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 25-26 апреля 2024 г.; VII Всероссийский научно-практический семинар «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства». Москва, НИУ МГСУ, 2024 г.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликованы 7 научных работ, в том числе 2 статьи в научных журналах, рекомендованных ВАК Российской Федерации, одна статья опубликована в журнале, индексируемом в международных реферативных базах Scopus.

Структура и объём диссертации. Диссертация содержит 147 стр. машинописного текста и имеет введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. В диссертацию также входят 66 рисунков, 13 таблиц, список литературных источников из 95 наименований, из которых 11 на иностранных языках.

Содержание работы

Во введении приводится актуальность темы исследования и, на основе анализа ранее проведенных исследований, обоснована степень ее разработки, определены подходящие методы и методология исследования; изложены научная новизна и положения, выносимые на защиту, а также доказана достоверность и практическая значимость полученных результатов лабораторных исследований.

В первой главе представлен анализ научных работ, посвященных изучению энергогасящих конструкций нижнего бьефа в области гидротехники, что дало возможность осознать значимость проблемы гашения энергии потока в целом. Гидротехника, как и многие другие науки, неуклонно развивается с течением времени. Исследования, проведенные различными учеными, способствовали тому, что проектировщики постепенно начали использовать методы противодействия негативным воздействиям кинетической энергии водного потока.

Во второй главе приводятся результаты исследования состояния русла реки Северный Кебир и гидроузла 16 Тишрин в САР, выполнен анализ природно-топографических и климатических условий, оказывающих существенное воздействие на процесс проектирования гидроузла. В данной главе также представлены методы прогнозирования формообразования русла реки Северный Кебир, основанные на гидравлических закономерностях, что позволяет улучшить понимание динамических изменений в русле. Кроме того, приводятся расчеты для водобойного колодца шахтно-башенного водосброса, которые играют ключевую роль в определении размеров водобойного колодца и его гасящих устройств.

Были выполнены соответствующие расчёты, связанные с прогнозом положения русла реки Северный Кебир и ее уклонов при прохождении паводков различной обеспеченности. В качестве расчётных приняты паводки трёх обеспеченностей: $P = 10\%$, с $Q = 753 \text{ м}^3/\text{с}$, обеспеченностью $P = 5\%$ с $Q = 1020 \text{ м}^3/\text{с}$ и обеспеченностью $P = 1\%$ с $Q = 1800 \text{ м}^3/\text{с}$.

При этом для определения величины допускаемой скорости использовалась формула Ц.Е. Мирцхулавы:

$$[V] = \left(\lg \frac{8,8 h}{d} \right) \cdot \sqrt{\frac{2mgd}{0,44n}} \sqrt{\left(1 - \frac{\rho_{\text{во}}}{\rho_{\text{гр}}} \right)}, \quad (1)$$

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

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

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

С учётом этих величин для частиц грунта диаметром крупнее $1 \text{ мм} = 0,001 \text{ м}$, получено $n = 4,32$, тогда

$$[V] = 4,88 \cdot \left(\lg \frac{8,8 h}{d} \right) \cdot \sqrt{d}. \quad (3)$$

Предварительно были построены кривые максимальных средних неразмывающих скоростей в зависимости от глубины потока для различных грунтов по зависимости (3) $[V] = f(h = \text{var}, d_{50\%} = \text{const})$. Эти кривые приведены на рисунке 1.

Затем определялись площади живого сечения в зависимости от глубины наполнения русла, а из уравнения неразрывности устанавливалась зависимость скорости потока от глубины для данного расхода. Затем на графике рисунка 1 наносилась кривая зависимости $V = f(h)$. Точка пересечения этой кривой с кривой $[V] = f(h)$ с $d_{50\%}$, соответствующей среднему диаметру фракций отложений в данном сечении, дает искомые значения допускаемой скорости $[V]$ и соответствующей ей глубине потока h . Таким образом находятся три основных параметра (глубина, ширина русла, расчетный диаметр частиц грунта), определяющие уклоны русла i , которые требуются для пропуска заданного расхода в русле, имеющем устойчивое поперечное сечение с данным гранулометрическим составом.

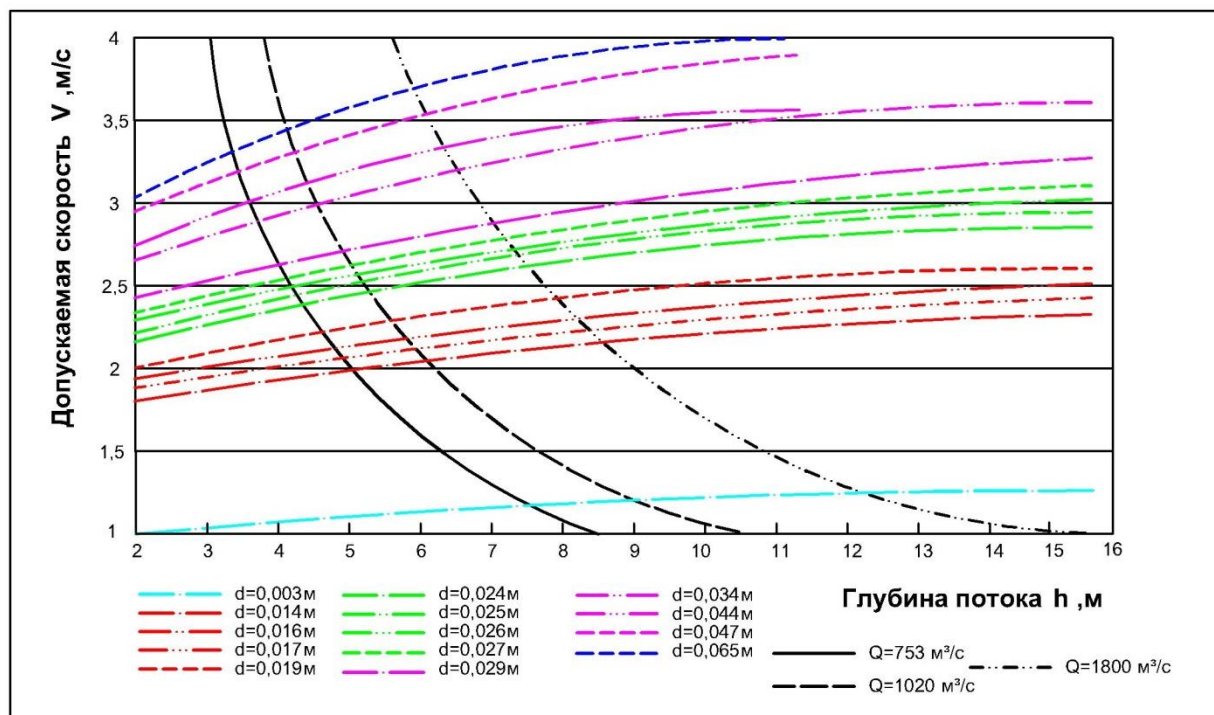


Рисунок 1 - Кривые зависимости неразмывающих скоростей потока в зависимости от его глубины $[V] = f(h)$ при $d_{50\%} = \text{const}$

Интегрирование уравнений, описывающих изменение уклонов вдоль реки, даёт уравнения при определении отметок дна для соответствующих участков русла после прохождения соответствующего паводка. Результаты расчётов прогноза положения русла реки Северный Кебир представлены в диссертации, из которых видно, что на большей длине рассматриваемого участка русла аллювиальные грунты русла могут быть размывы до скальных пород уже при прохождении расхода $Q = 753\text{ м}^3/\text{с}$ обеспеченностью $P = 10\%$.

Расчёты прогноза деформаций русла носят предварительный, качественный характер, тем не менее, полученные данные могут быть приняты в качестве первого приближения для разработки мероприятий, обеспечивающих сохранность ценных пойменных земель в нижнем течении реки Северный Кебир.

Объектом экспериментальных исследований был выходной участок шахтно-башенного водосброса гидроузла 16 Тишрин, выполненный в виде гладкого расширяющегося водобойного колодца. Гидроузел 16 Тишрин на реке Северный Кебир был построен для создания водохранилища сезонного регулирования речного стока. Главным назначением водохранилища является орошение прилегающих земель, расположенных в долине реки Северный Кебир. Основные гидротехнические сооружения гидроузла 16 Тишрин показаны на рисунке 2.



Рисунок 2 - Космический снимок сооружения гидроузла 16 Тишрин:
 1 - грунтовая плотина; 2 - регулируемый береговой водосброс; 3 - нерегулируемый шахтно-башенный водосброс; 4 - левобережный ирригационный водовыпуск; 5 - ирригационный правобережный туннель

Береговой водосброс предназначен для пропуска повышенных расходов речного стока и регулирования расходов. Его проектный расход составляет $1800 \text{ м}^3/\text{с}$. Шахтно-башенный водосброс предназначен для пропуска расходов паводка высокой повторяемости. Проектный расход шахтного водосброса составляет $900 \text{ м}^3/\text{с}$. Он включает в себя башню, водопроводящую одночковую трубу и выходной оголовок с гладким водобойным колодцем и комбинированной рисбермой. Отметка гребня круглой водоприёмной воронки, диаметром 21,2 м располагается на уровне НПУ = 74,5 м. Внутренняя поверхность водоприёмной воронки выполнена по форме нижней поверхности кольцевой струи. Башня шахты высотой 60,5 м запроектирована как труба прямоугольного поперечного сечения размером 15 x 4,8 м. Башня сопряжена с отводящим трубопроводом с помощью колена с дефлектором, обеспечивающим отрыв потока от потолка отводящей трубы и безнапорный режим движения воды в трубе во всём диапазоне возможных расходов. Размер водобойного колодца шахтно-башенного водосброса определялся по условию гашения энергии потока с расходом $900 \text{ м}^3/\text{с}$. Он запроектирован плавно расширяющимся в плане от 15 до 30 м и имеет глубину 9 м.

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

1. При проектировании сооружений гидроузла не было учтено понижение отметок дна русла, связанное с интенсивным отбором гравелистого материала из русловых отложений. В результате при пропуске строительных расходов в

1984 году через трубопровод шахтно-башенного водосброса были полностью разрушены его водобой и рисберма.

2. Наличие отогнанного гидравлического прыжка привело к разрушению рисбермы, самого колодца и к деформациям отводящего русла.

Фактическая скорость потока на рисберме, равная $V = 6,12$ м/с, является неприемлемой для имеющихся грунтов основания, что и показывают наблюдаемые размывы в нижнем бьефе. В связи с этим требуется снизить удельные расходы, а, следовательно, и скорости потока на выходе из водобойного колодца путем установки в нем энергогасящих устройств.

В третьей главе описываются экспериментальная установка, методика проведения исследований, используемое 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.

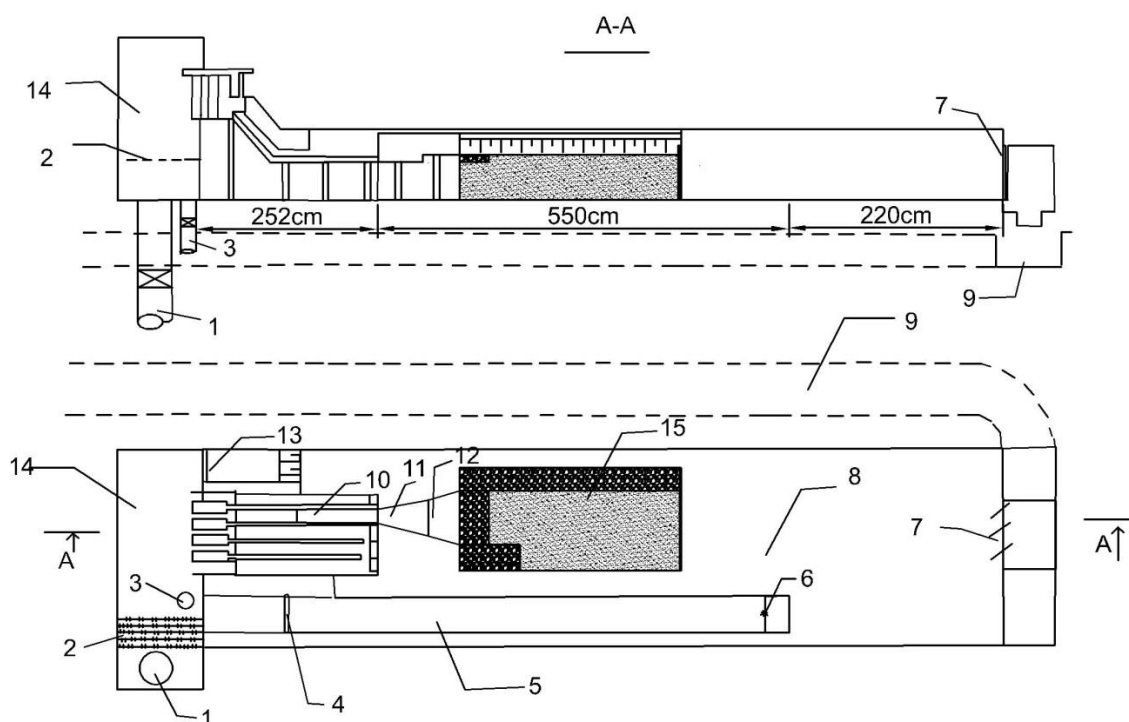


Рисунок 3 - Общий вид экспериментальной установки:

1 – подающая труба; 2 – решетки; 3 – сливной трубопровод; 4 – затвор; 5 – канал; 6 – подъемный механизм для регулирования уклона канала; 7 – жалюзийный затвор; 8 – пространственный лоток; 9 – отводящий лоток; 10 – используемый пролет в опытах; 11 – водобойный колодец; 12 – рисберма; 13 – пьезометрический щит; 14 – приемный бак; 15 – нижний бьеф

Модель водобойного колодца была выполнена в масштабе 1:70 к натурному сооружению. Вода поступала на экспериментальную установку из приемного бака, который заполнялся из централизованного резервуара, куда

насосы подавали воду из подземной емкости (рис. 3). Для поддержания необходимой величины напора в модели использовалась регулировка затвором, позволяющая отводить излишки воды через специальный канал.

Эксперименты проводились при пропуске эксплуатационного расхода шахтно-башенным водосбросом с измерением скоростей в створах I...IV по длине (рис. 4) и в створах поперек потока, расположенных на модели с одинаковым шагом, равным $B/4$, где B - ширина створа, что выбрано для наглядности изображения полей скоростей в нижнем бьефе водосброса.

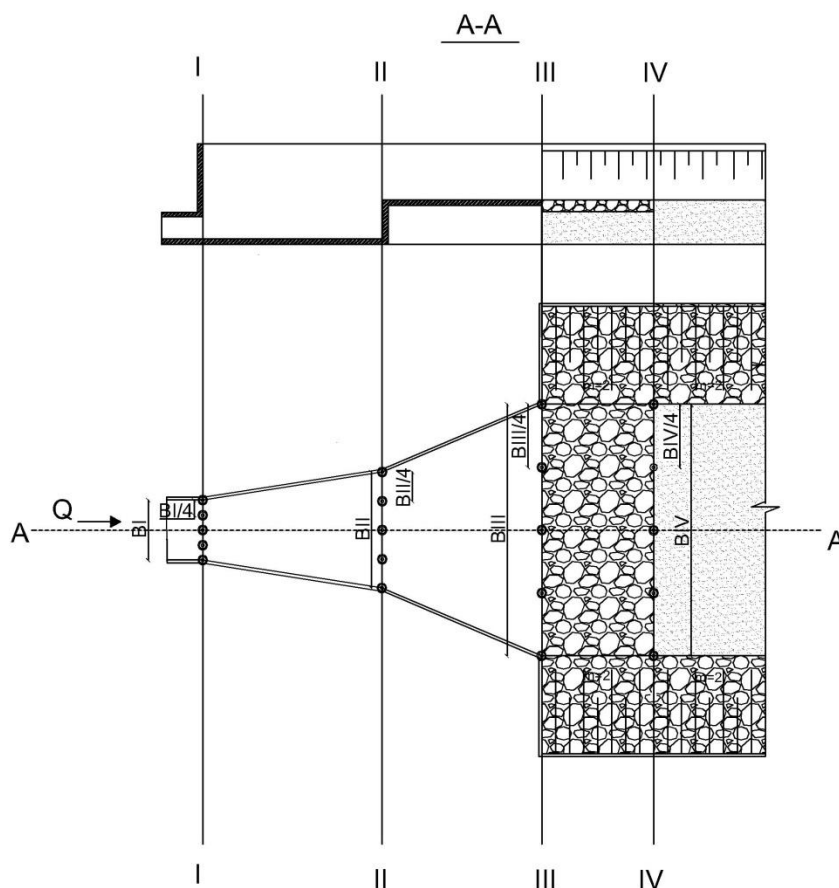


Рисунок 4 - Схема положения створов замера скоростей на модели в продольном и поперечном направлении: продольных створов на расстоянии $B_i/4$; I... IV - номера поперечных створов. М 1:70 (схема 1)

Сначала проводились измерения скоростей на исследуемом участке при пропуске максимального эксплуатационного расхода $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ ($h_{НБ} = 4,9 \text{ м}$), когда функционирует только шахтно-башенный водосброс. Потом также выполнялись замеры при пропуске суммарного расхода $Q = 2700 \text{ м}^3/\text{с}$ ($h_{НБ} = 9 \text{ м}$), соответствующего одновременной работе обоих водосбросов гидроузла.

Затем на водобойном колодце и рисберме устанавливались энергогасители, аналогичные тем (см. таблицу 1), которые были подобраны в результате модельных многофакторных исследований на ряде гидроузлов с аналогичными граничными условиями, в частности, в нижнем бьефе водосбросов Нижне-Кафирниганского (схема 2 на рис. 5) и Шамхорского гидроузлов (схема 3 на рис.6).

Таблица 1 - Исследованные схемы гасящих устройств участка сопряжения за шахтно-башенным водосбросом

Схемы	Энергогасители	Примечание
Схема 1	Гладкий водобойный колодец	Проектный вариант
Схема 2	4 ряда гасителей: 1 - треугольный растекатель; 2 – порог противозрозионного очертания; 3 – прорезная стенка в конце колодца; 4 – сплошная стенка на рисберме	Типа Нижне-Кафирниганского гидроузла
Схема 3	3 ряда гасителей: 1 – треугольный растекатель; 2 – растекатели и сплошная стенка в конце колодца; 3 – сплошная стенка на пониженной части рисбермы	Типа Шамхорского гидроузла
Схема 4	5 рядов гасителей: 1-3 треугольные растекатели; 4 и 5 – сплошная и прорезная водобойные стенки	Разработанный тип

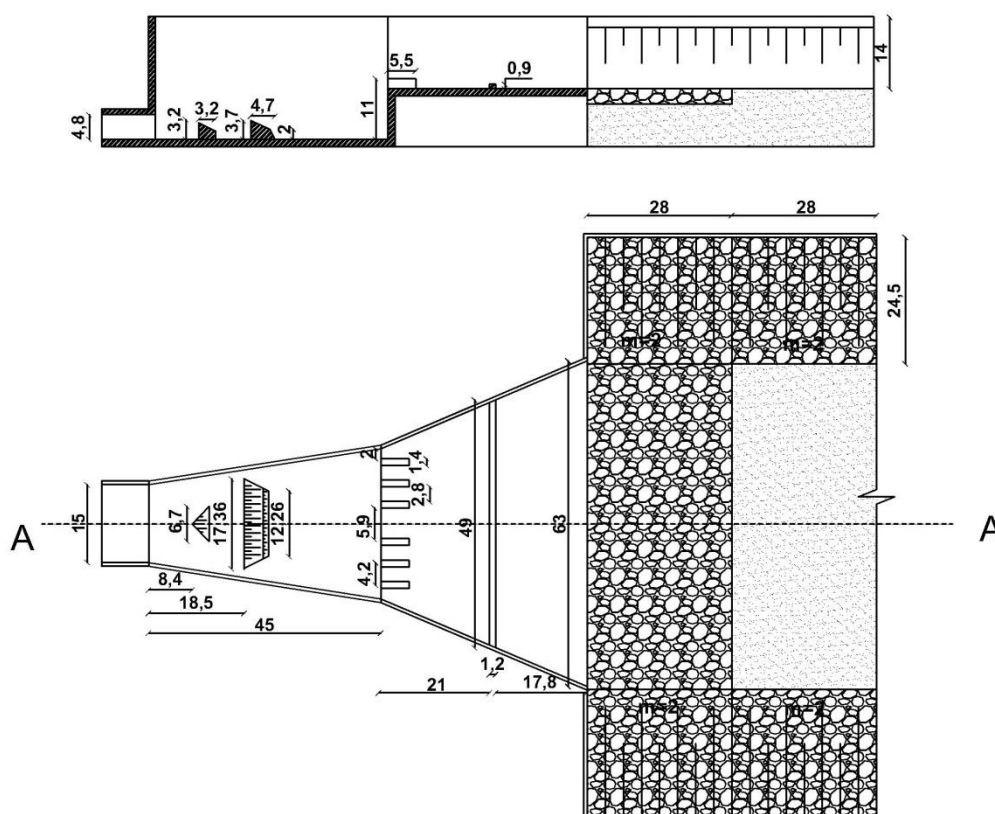


Рисунок 5 - Продольный разрез (по А-А) и горизонтальная проекция модели с 4-мя рядами энергогасителей (схема 2)

Несмотря на имеющийся целый ряд исследований, посвящённых изучению гидродинамических воздействий на водобой и подбору конструкций устройств крепления нижнего бьефа гидроузлов, анализ которых приведён в главе 1, необходимо для ответственных сооружений прибегнуть к научным экспериментальным исследованиям, позволяющим для данного конкретного случая получить оптимальную конструкцию водобойного колодца.

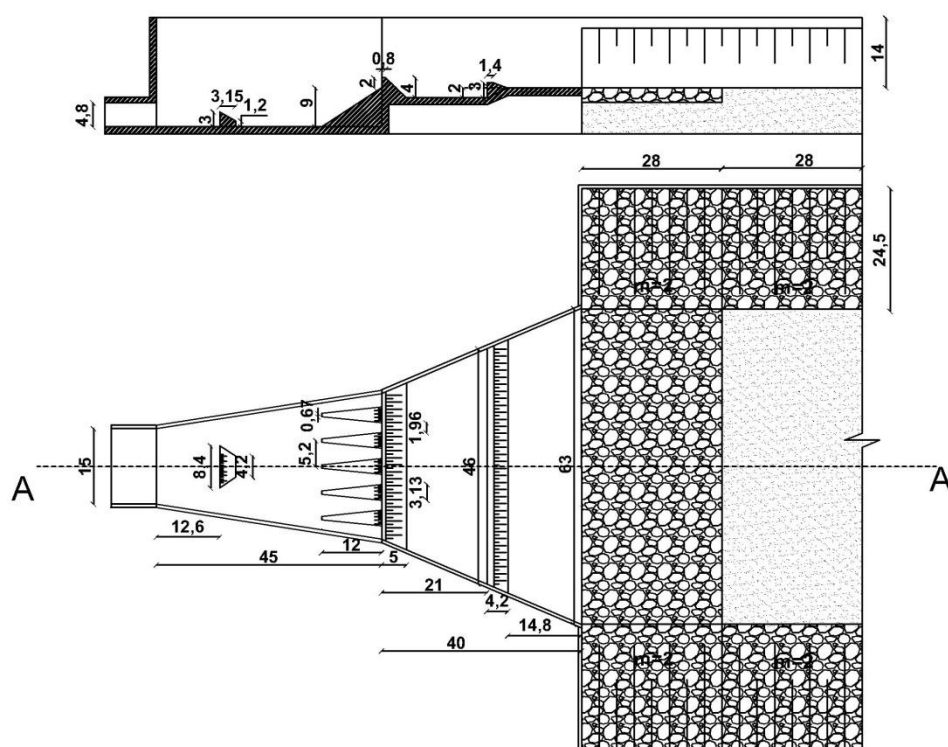


Рисунок 6 - Продольный разрез по оси А-А и план модели с 3-мя рядами энергогасителей (схема 3)

Критериями при выборе оптимальной конструкции гасителей для условий, характерных для гидроузла 16 Тишрин на р. Северный Кебир, являлось наиболее эффективное гашение избыточной энергии потока, растекание потока на рисберме, отсутствие сбойности потока при всех режимах работы водосбросного сооружения и уменьшение скорости за ней, обеспечивающее снижение риска размыва отводящего русла водотока. Конструкция гасителей, подобранная в результате теоретических и экспериментальных исследований, удовлетворяющая всем этим критериям представлена на рисунке 7.

В четвёртой главе представлены результаты экспериментальных исследований гидравлических процессов, связанных с функционированием водобойного колодца шахтно-башенного водосброса гидроузла, целью которых была оценка влияния различных конструктивных решений на параметры потока и обеспечения его устойчивости в отводящем русле.

Во-первых, были определены с использованием формулы Ц.Е. Мирцхулавы допускаемые скорости. На рисунке 8 показана зависимость допускаемых скоростей в районе ковша за рисбермой и русла за участком сопряжения от глубины воды в нижнем бьефе и от среднего диаметра грунта, слагающего русло реки (для первого и второго слоев грунта).

Во-вторых, были получены результаты измерений скоростей течения в нижнем бьефе в рамках проектного варианта (схема 1). Измерения скоростей проводились для расходов 300, 600 и 900 м³/с при работе исключительно шахтно-башенного водосброса.

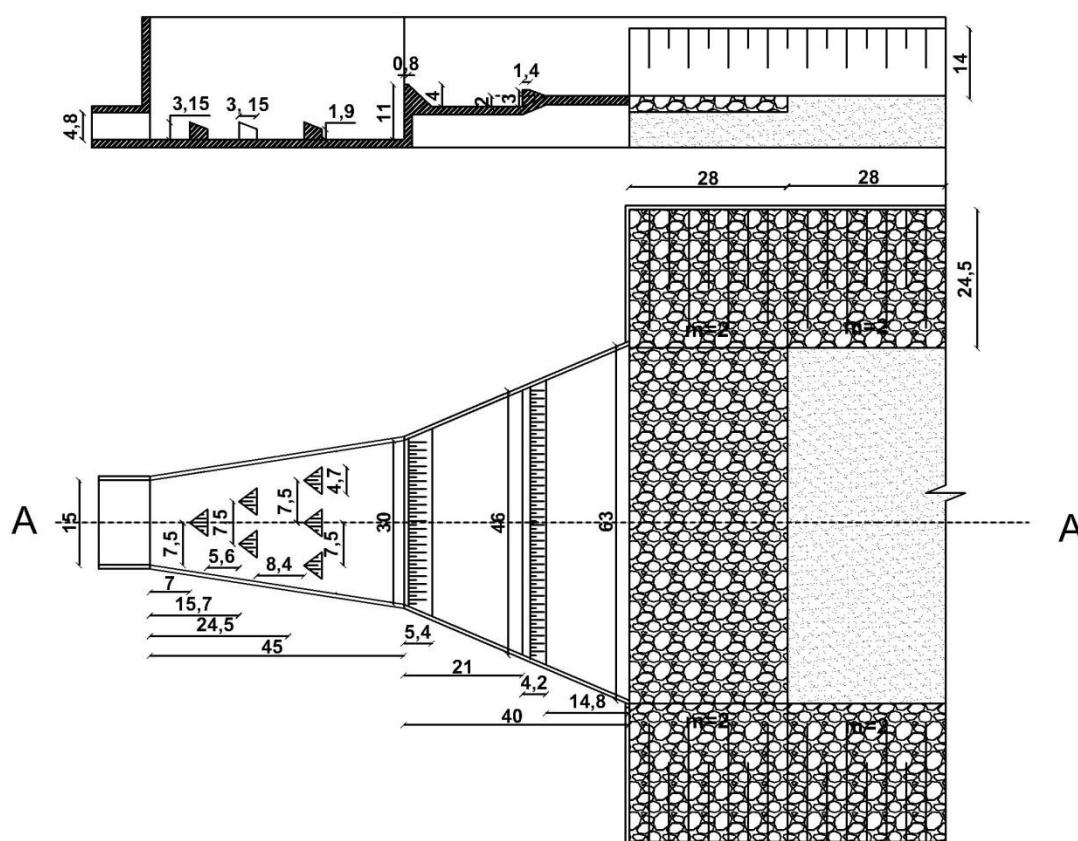


Рисунок 7 – Предлагаемая конструкция энергогасящих устройств при установке в водобойном колодце гасителей треугольной формы (схема 4)

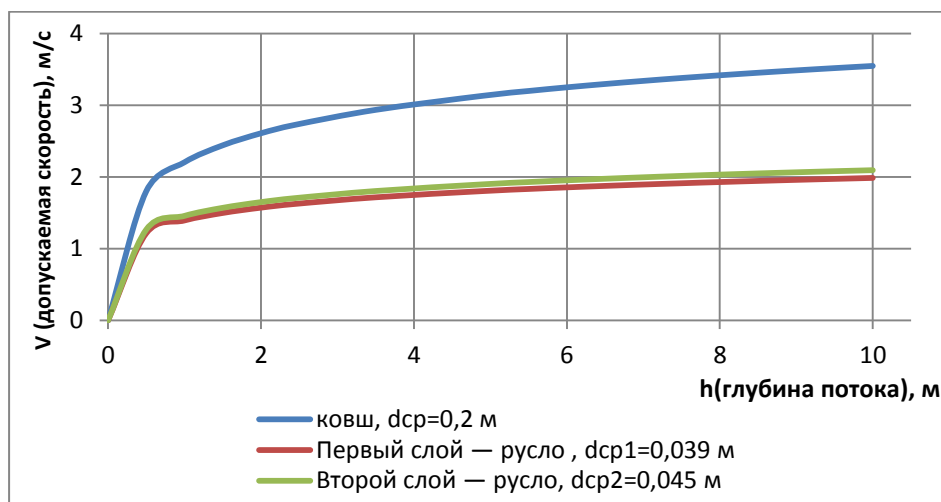


Рисунок 8 - Кривые зависимости неразмывающих скоростей потока в зависимости от его глубины $[V] = f(h)$ при среднем диаметре грунта $d_{ср} = d_{50\%}$ в нижнем бьефе гидроузла 16 Тишрин

Также для расхода $2700 \text{ м}^3/\text{с}$ были собраны данные в условиях одновременной эксплуатации обоих водосбросов и максимально возможной пропускной способности, осуществляемой при глубине воды в нижнем бьефе 9м. Результаты экспериментов представлены в виде эпюр скоростей на рисунках 9 и 10.

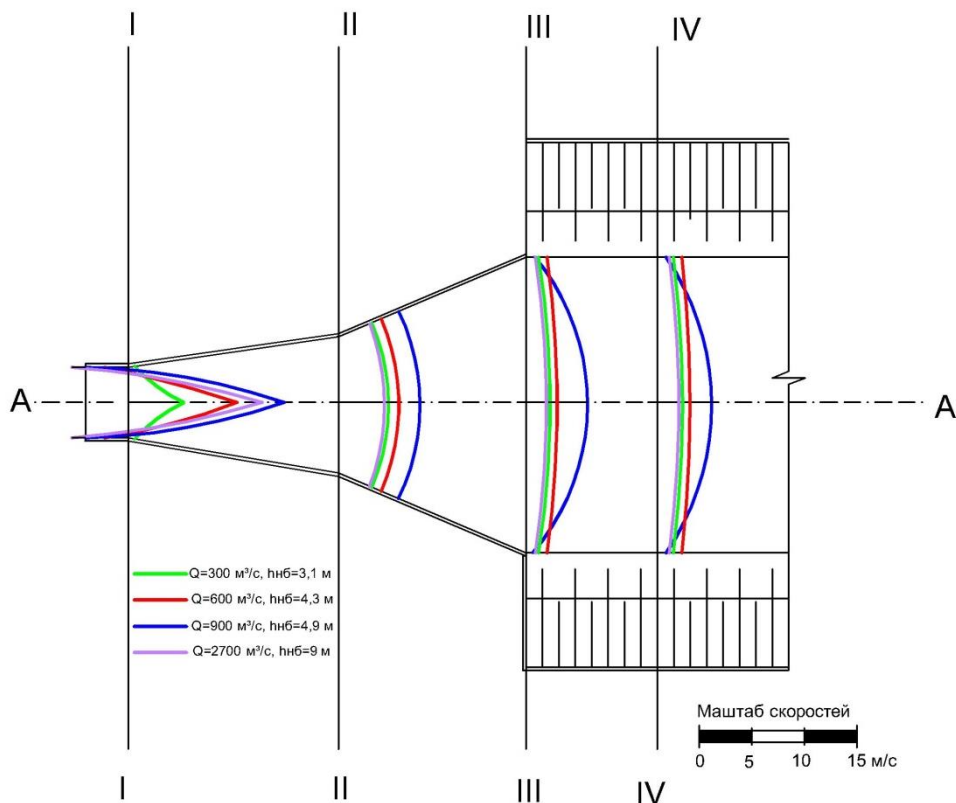


Рисунок 9 - Измеренные донные плановые эпюры скоростей при различных расходах и глубинах в нижнем бьефе

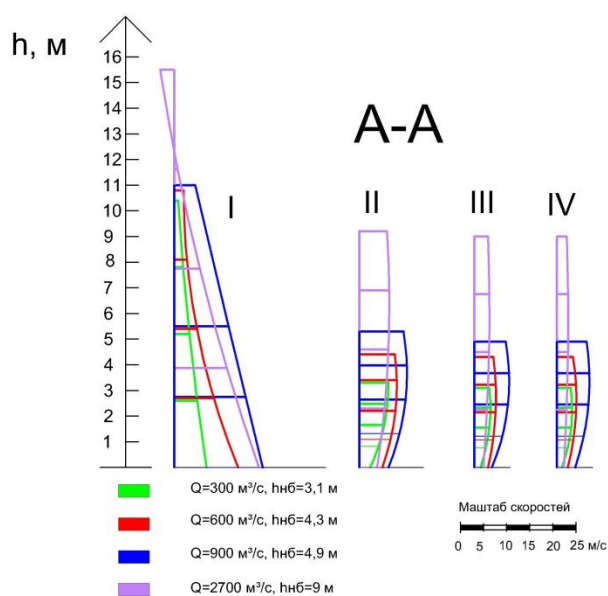


Рисунок 10 - Эпюры скоростей в центральном продольном сечении по оси А-А в створах I...IV

Сравнение фактических и допускаемых скоростей при разных режимах работы водосброса представлены в таблице 2, где допускаемые скорости рассчитывались по формуле Ц.Е. Мирцхулавы, исходя из глубины воды в нижнем бьефе и среднего диаметра грунта $d_{ср}$.

Таблица 2 - Сравнение максимальной фактической скорости и допускаемой скорости в нижнем бьефе для первого и второго слоев грунта русла

Параметры	$Q_H = 300 \text{ м}^3/\text{с},$ $h_{НБ} = 3,1 \text{ м}$	$Q_H = 600 \text{ м}^3/\text{с},$ $h_{НБ} = 4,3 \text{ м}$	$Q_H = 900 \text{ м}^3/\text{с},$ $h_{НБ} = 4,9 \text{ м}$	$Q_H = 900 \text{ м}^3/\text{с},$ $h_{НБ} = 9 \text{ м}$
Створ III-III				
$V_{Hmax}, \text{ м/с}$	1,82	2,40	4,70	1,80
$V_{Hдоп}, \text{ м/с}$	2,87	3,06	3,13	3,45
Створ IV-IV				
$V_{Hmax}, \text{ м/с}$	1,52	2,20	2,40	1,78
$V_{Hдоп1}, \text{ м/с}$	1,69	1,77	1,80	1,96
$V_{Hдоп2}, \text{ м/с}$	1,77	1,86	1,90	2,07

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

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

В-третьих, были получены результаты исследования скоростей в нижнем бьефе после установки энергогасителей по схеме 2. Измерения скоростей были осуществлены при расходе воды 900 м³/с в ходе эксплуатации шахтно-башенного водосброса с глубиной в нижнем бьефе $h_{НБ} = 4,9 \text{ м}$. В результате наблюдения за движением воды в водобойном колодце было констатировано, что в начальной зоне водобоя из-за взаимодействия с возвратным движением воды образуются вихревые структуры, которые приводят к появлению вихревых зон и отрицательным скоростям, достигающих 0,9 м/с.

За рассеивающим порогом также наблюдается закручивание потока по боковым сторонам порога, близким к внутренним стенкам водобойного колодца. Это явление приводит к усилению вихрей, захвату воздуха и повышению вероятности формирования вихрей в области водобоя, как показано на рисунке 11. Максимальная придонная скорость, равная 3,4 м/с в поперечном сечении III – III (конец рисбермы), хотя и меньше чем скорость по варианту водобойного колодца по схеме 1, превышает предельно допустимую величину, рассчитанную в соответствии с формулой Ц.Е. Мирцхулавы. Для ковша, заполненного камнем со средним диаметром 20 см, и уровнем воды в НБ равным 4,9 м расчетная допускаемая скорость составляет $V_{Hдоп} = 3,13 \text{ м/с}$.

Превышение допустимых значений указывает на возможное возникновение эрозионных процессов в зоне ковша, заполненного камнем диаметром (0,1...0,3) м.

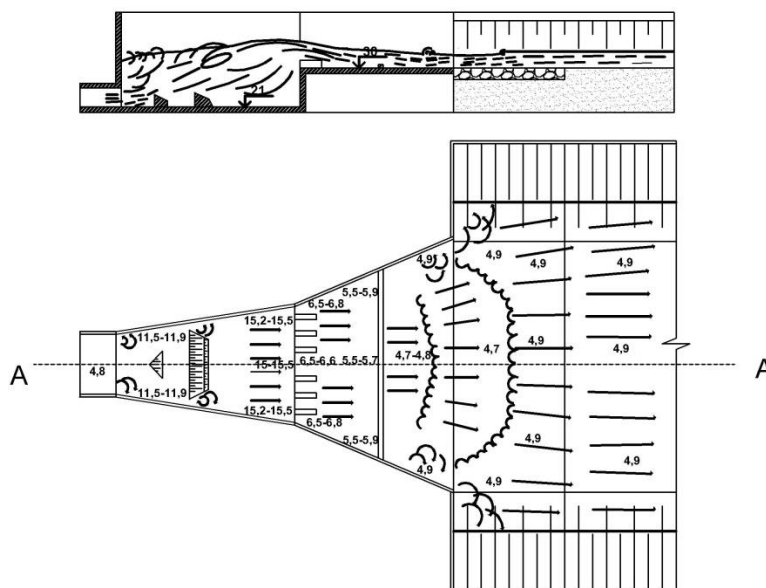


Рисунок 11 - Картина движения потока и изменения глубины воды при $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$, $h_{НБ} = 4,9 \text{ м}$ (схема 2)

Максимальная скорость в поперечном сечении IV (конец ковша), $V_{Hmax} = 3 \text{ м/с}$ превышает предельно допустимые значения, указанные на рисунке 9 для русла, где $V_{Hдон1} = 1,8 \text{ м/с}$ и $V_{Hдон2} = 1,9 \text{ м/с}$. Это свидетельствует о возникновении деформационных процессов как в области русла, так и о возможном распространении этих деформаций на глубину до 2,5 м в пределах второго слоя грунта исследуемой зоны. В связи с этим возникла необходимость в исследовании дополнительных вариантов энергогасящих устройств, способствующих улучшению процесса рассеивания энергии и обеспечивающих уверенность в том, что эрозия не будет наблюдаться в нижнем бьефе.

В-четвёртых, были получены результаты исследования скоростей в нижнем бьефе после установки энергогасителей (схема 3). Измерения скоростей проводились при расходе воды $900 \text{ м}^3/\text{с}$ в процессе функционирования шахтно-башенного водосброса с уровнем воды в нижнем бьефе $h_{НБ} = 4,9 \text{ м}$. В результате углубления рисбермы и наличия здесь водобойной стенки в этой зоне наблюдаются обратные токи воды, что указывает на эффективность диссипации энергии на рассматриваемой модели. При этом максимальная скорость в сечении III – III остается ниже предельно допустимого значения, рассчитанного согласно формуле Ц.Е. Мирцхулавы. Для ковша с грунтом диаметром 20 см и глубиной воды в нижнем бьефе 4,9 м расчётная допустимая скорость равняется $V_{Hдон} = 3,13 \text{ м/с}$. Это указывает на то, что благодаря эффективности предложенных гасителей, снижающих скорость потока и обеспечивающих хорошее равномерное распределение скоростей по сечению III - III, не происходит размывов и эрозии в зоне ковша. В то же время, максимальная скорость в поперечном сечении IV- IV, равная $V_{Hmax} = 2,65 \text{ м/с}$, превышает предельно допустимые показатели, установленные для русла и

зафиксированные во время эксперимента, где $V_{Hдон1} = 1,8$ м/с и $V_{Hдон2} = 1,9$ м/с. Это свидетельствует о наличии деформационных процессов как в самой области русла, так и о вероятном распространении этих деформаций до глубины 2,5 м в пределах второго слоя исследуемой зоны.

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

Учитывая эти аспекты, возникла необходимость в разработке альтернативных решений по установке гасителей, которые обеспечивали бы большую стабильность потока на всём водобойном участке.

В-пятых, было выполнено исследование кинематики потока в нижнем бьефе после установки разработанной и экспериментально обоснованной схемы энергогасителей (схема 4). В результате анализа схемы 2 и схемы 3 было установлено, что обе схемы демонстрируют высокую эффективность в рассеивании энергии водного потока и снижении его скорости после рисбермы. Однако, схема 3 достигает более оптимального уровня рассеивания по сравнению со схемой 2. В то же время возникает проблема: в зоне водобойного колодца в обеих схемах наблюдаются нарушения в сплошности движения воды и образование вихрей. Чтобы решить эту проблему, в предложенной схеме 4, рекомендуется сохранить конструкции гасителей, аналогичные тем, что используются в схеме 3, а также внедрить растекатели треугольной формы в колодце (рис. 12). Размеры этих растекателей были тщательно рассчитаны с целью предотвращения возникновения нежелательных гидравлических явлений.

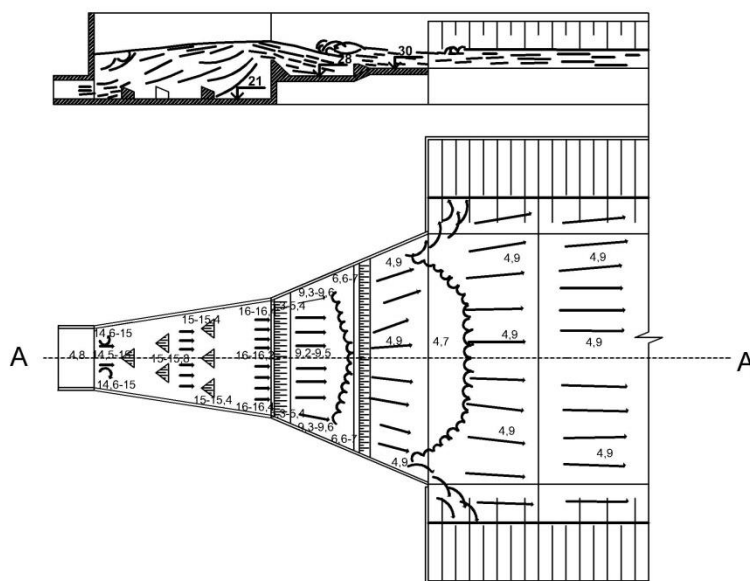


Рисунок 12 – Картина движения потока и изменения глубины воды при $Q = 900$ м³/с, $h_{НБ} = 4,9$ м (схема 4)

Измерения скоростей проводились при расходе воды 900 м³/с в процессе функционирования шахтно-башенного водосброса с уровнем воды в нижнем бьефе $h_{НБ} = 4,9$ м. В диссертации представлены результаты измерений глубин и скоростей потока для схемы 4 при изменении параметров потока в широком диапазоне.

Максимальная донная скорость в поперечном сечении III - III и IV - IV при установке гасителей этой схемы достигает 2,90 м/с и 2,58 м/с в продольном сечении А-А. Для ковша с диаметром камня 20 см и уровнем воды 4,9 м расчетная допускаемая скорость равняется $V_{Hдон} = 3,13$ м/с. Это указывает на то, что благодаря эффективности предложенных гасителей (схема 4), снижающих скорость потока и обеспечивающих хорошее равномерное распределение скоростей по сечению III - III, скорее всего не будет происходить размывов в зоне ковша. В то же время, максимальная скорость в поперечном сечении IV - IV, равная $V_{Hmax} = 2,58$ м/с, превышает предельно допустимые показатели, установленные для грунта русла реки ($V_{Hдон1} = 1,8$ м/с и $V_{Hдон2} = 1,9$ м/с). Это свидетельствует о наличии деформационных процессов, как в самой области русла, так и с вероятным распространением этих деформаций до глубины 2,5 м в пределах второго слоя исследуемой зоны. Необходимым инженерным решением может быть, например, дополнительное крепление дна и откосов отводящего канала камнем крупностью, которая обеспечит допускаемые скорости, обеспечивающие отсутствие размывов русла.

В пятой главе приводится анализ результатов гидравлических исследований при установке различных схем гасителей, а также оценки устойчивости грунта за жёсткой рисбермой шахтно-башенного водосброса. Для формирования интегральной оценки эффективности экспериментально изученных схем был проведен анализ эпюр местных скоростей, представленных на рисунке 13, в области середины поперечного створа IV - IV, по оси А-А. Анализ эпюр скорости разных схем демонстрирует снижение значений скорости в схемах 2, 3 и 4, что обусловлено введением энергогасителей и увеличением глубины участка рисбермы. При этом в схеме 4 устанавливается минимально возможная скорость в сечении IV - IV при фиксированной (для всех схем) глубине воды в нижнем бьефе. Это снижение достигается благодаря подобранным гасящим устройствам, которые приводят к оптимальному распределению скоростей по всему створу, что в свою очередь позволяет максимально приблизить их к средним значениям скоростей.

Избыточная энергия водного потока, погашенная с использованием энергогасящих устройств, оценивалась на основании разности между удельной энергией в сечении при исследуемой схеме и удельной энергией в сечении при схеме 1, при которой энергогасящие устройства не были применены (рис. 14).

Для оценки эффективности той или иной конструкции был определён коэффициент гашения в поперечном створе k_n :

$$k_n = \frac{E_1 - E_n}{E_1} \quad (4)$$

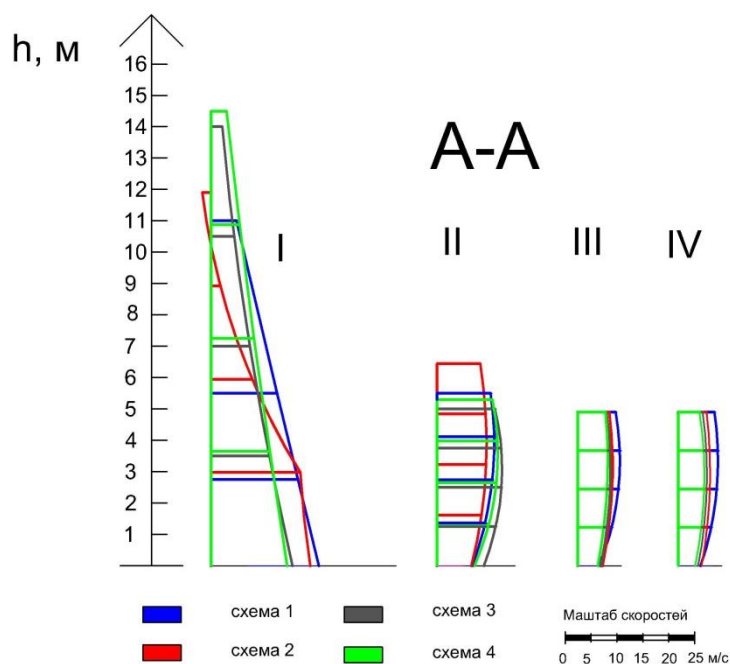


Рисунок 13 - Эпюры скоростей в центральном продольном сечении А-А и поперечном створе IV – IV

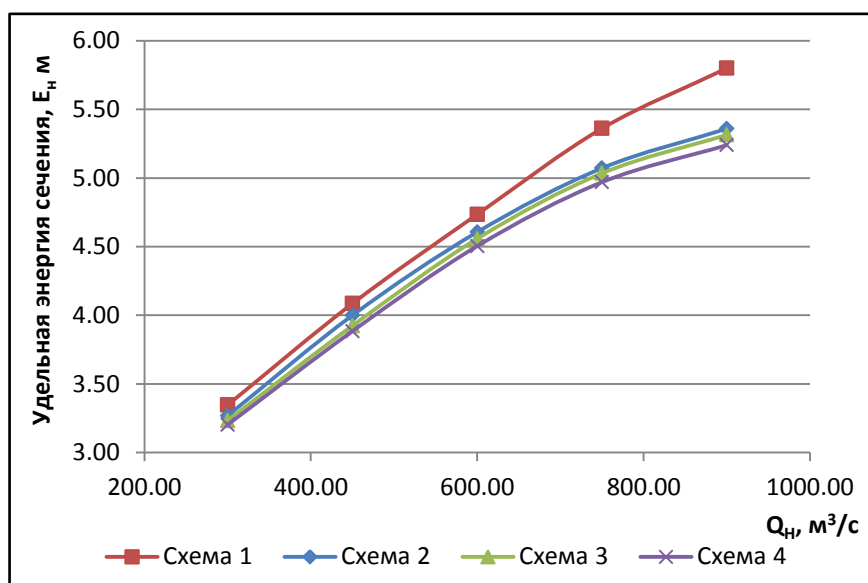


Рисунок 14 - Кривые изменения удельной энергии потока в сечении поперечного створа IV - IV при разных расходах

Для анализа и сравнения полученных результатов, а также выбора в результате наиболее эффективного типа, формы и размеров гасителей были определены коэффициенты потерь « k_{IV} » избыточной энергии потока по длине колодца от его начала до створа IV – IV для соответствующих схем водобойного колодца (рис. 15). Коэффициент потерь избыточной энергии потока по длине с энергогасящими устройствами нижнего бьефа (схема 4) демонстрирует стабильно высокие значения при работе водобойного колодца по сравнению с другими исследованными схемами.

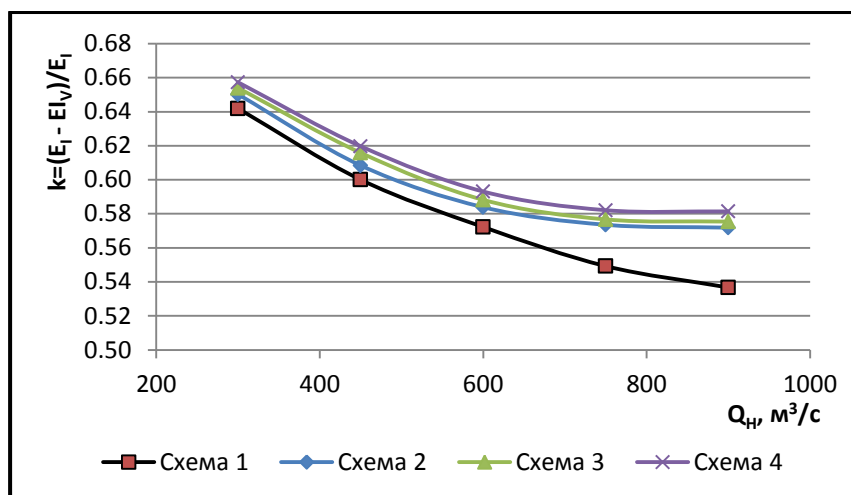


Рисунок 15 - Зависимость коэффициента потерь избыточной энергии « k » от расхода Q для исследованных схем водобойного колодца

Коэффициент гашения, отражает общие потери избыточной энергии на участке от входного сечения в водобойный колодец до исследуемого сечения IV - IV. Для оценки дополнительных потерь напора, возникающих исключительно в результате установки гасителей, необходимо вычесть коэффициент гашения, полученный при проектном варианте схемы 1.

Для оценки устойчивости грунта за жёсткой рисбермой шахтно-башенного водосброса, используя полученные результаты экспериментов, приведены рекомендации по назначению необходимых параметров ковша, соответствующие длине участка, заполненного крупным камнем при ремонте нижнего бьефа. Дана последовательность определения диаметра камня, который следует положить за рисбермой, обеспечивающего отсутствие размыва на дне отводящего участка. Проведен анализ максимальных скоростей, возникающих при прохождении максимального эксплуатационного расхода $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ в створах III - III и IV - IV для предложенной схемы 4. Можно констатировать, что в створе III - III и на расстоянии 28 м после рисбермы никаких размывов в грунте не происходит, поскольку максимальная скорость меньше, чем допускаемая для крепления камнем больших диаметров (0,1...0,3)м.

При этом следует отметить, что на расстоянии 28 м от рисбермы и после сечения IV - IV, где залегают естественные грунты, максимальные скорости $V = 2,58 \text{ м/с}$ превышают допускаемые значения, возможен размыв, достигающий глубины до 2,5 м. Используя формулу Ц.Е. Мирцхулавы (3) с помощью программы Excel было установлено, что при $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ и $h_{нб} = 4,9 \text{ м}$ для защиты от размыва необходим минимальный диаметр каменного крепления более $d_{ср} = 0.083 \text{ м} \approx 9 \text{ см}$. Таким образом, можно сделать вывод, что для обеспечения устойчивой и безопасной для других сооружений гидроузла работы нижнего бьефа, целесообразно создать при реконструкции или капитальном ремонте за бетонным участком рисбермы гибкую концевую часть рисбермы из каменной наброски, которую можно даже закончить зубом из бетона, камня или габионных структур глубиной не более 1 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

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

4. Анализ работы трех вариантов рассмотренных конструкций устройств нижнего бьефа при установке энергогасителей схем 2, 3 и 4 показал снижение максимальных скоростей в контрольных створах, что способствует снижению риска размыва русла. В частности, предложенные схемы гашения позволяют уменьшить значения скорости на $27,6\% \dots 38,2\%$, в зависимости от

типа разработанной конструкции. Это подтверждает, что установка гасителей и растекателей потока действительно эффективна для обеспечения стабильности и безопасности гидротехнических сооружений разной степени ответственности.

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

5. В результате лабораторных исследований был разработан подход к повышению надежности функционирования гидроузла после реновации, заключающийся в удлинении крепления горизонтальной рисбермы за концевым участком в виде засыпанного ковша на оптимальное расстояние с учетом размера камня и толщины крепления. Данная мера направлена на предотвращение размыва нижнего бьефа и может рассматриваться как наиболее экономичное и практичное решение, учитывая низкие затраты по его устройству, а также простоту реализации данного подхода в процессе ремонтных работ.

Рекомендации и перспективы дальнейшего развития темы исследований

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

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ:

1. Алсадек Елиас Садек. Недостатки конструкции водобойного колодца гидроузла Тишрин в САР и предложения по их исправлению / Алсадек

Елиас Садек, А.П. Гурьев, Н.В. Ханов, Д.В. Козлов // Гидротехническое строительство. - 2023. - № 9. - С. 27-33.

2. Алсадек Елиас Садек. Крепление в нижнем бьефе шахтно-башенного водосброса гидроузла "16 тишрин" / Алсадек Елиас Садек // Природообустройство. – 2024. - №3. – С. 63-70.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных:

3. Alsadek Elias Sadek. Theoretical substantiation of the method for predicting the formation of the northern Kebir river (Syrian Arab Republic) using morphometric dependencies and hydraulic patterns of water movement / Alsadek Elias sadek, A.P. Guryev, N.V. Khanov // Power Technology and Engineering. – 2023. Vol. 56, No. 6. P. 866-871. – DOI 10.1007/s10749-023-01602-z. – EDN UMQOLI.

Публикации в других изданиях:

4. Алсадек Елиас Садек. Состояния русла реки Северный Кебир в САР / Алсадек Елиас Садек, А.П. Гурьев, Н.В. Ханов // Всероссийская с международным участием научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 155-летию со дня рождения Н.Н. Худякова. Сборник статей. Том 1, 2021, С. 240-244.

5. Алсадек Елиас Садек. Некоторые закономерности строения русла реки Северный Кебир в САР / Алсадек Елиас Садек // Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённой 135-летию со дня рождения А.Н. Костякова. Сборник статей. Том 1, 2022, С. 77-80.

6. Алсадек Елиас Садек. Выбор параметров водоотводящей трубы шахтного водосброса-гидроузла Тишрин в Сирийской Арабской Республике / Алсадек Елиас Садек // XIV Национальная конференция с международным участием «Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения». Сборник статей. Саратов, 2024, С. 298-301.

7. Алсадек Елиас Садек. Гидравлические исследования эффективности водобойных устройств за шахтным водосбросом по рассеиванию водной энергии гидроузла Тишрин в САР / Елиас Садек Алсадек, Н.В. Ханов, Д.В. Козлов, Хозефа Алали // Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства: Сборник тезисов докладов VII Всероссийского научно-практического семинара, Москва, 22 мая 2024 года.