УДК 621.311.212-022.51(575.2)
DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-8-145-152

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ МАЛЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ГОРНЫХ РЕКАХ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Б.А. Ботоканова, Д.А. Бейшенкулова, М.Ж. Омурзакова

Аннотация. Представлено научно-техническое обоснование конструктивных решений гидротехнических сооружений малой гидроэлектростанции деривационного типа на горной местности. Проектирование малых ГЭС на реках Кыргызского хребта осложнено высокой сейсмичностью до 9 баллов и экстремальной мутностью потока до 20000 г/м³. В работе предложена усовершенствованная компоновка водозаборного узла Тянь-Шаньского типа для реки Шамси, адаптированная к этим условиям. Обоснованы геометрические параметры однокамерного отстойника с гидравлической промывкой, обеспечивающего осаждение абразивных частиц крупностью более 0,3 мм, что соответствует требованиям турбинного оборудования Crossflow. Результаты гидравлического моделирования подтвердили, что суммарная пропускная способность водосбросных элементов (38,0 м³/с) превышает поверочный расход 1 % обеспеченности с нормативным запасом 3,5 %. Подтверждение прочностных характеристик стального турбинного трубопровода диаметром 1400 мм доказало его надёжность при комбинированном воздействии внутреннего давления, температурных деформаций и сейсмических нагрузок до 9 баллов по шкале MSK-64. Разработанные инженерные решения обеспечивают безнаносный режим работы водозаборного сооружения, долговечность конструкций и экономическую эффективность эксплуатации гидротехнических сооружений.

Ключевые слова: малые ГЭС; горные реки; водозаборный узел; наносы; сейсмостойкость; гидравлический расчёт; деривация; гидротурбина; расход воды; Кыргызстан.

КЫРГЫЗ РЕСПУБЛИКАСЫНЫН ТОО ДАРЫЯЛАРЫНДА КИЧИ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯЛАРДЫН ГИДРОТЕХНИКАЛЫК КУРУЛМАЛАРЫНЫН КОНСТРУКЦИЯЛЫК ЧЕЧИМДЕРИН НЕГИЗДӨӨ

Б.А. Ботоканова, Д.А. Бейшенкулова, М.Ж. Омурзакова

Аннотация. Бул макалада Шамси тоо дарыясында деривациялык типтеги кичи гидроэлектростанциянын гидротехникалык курулмаларынын конструкциялык чечимдеринин илимий – техникалык негиздемеси берилген. Изилдөөнүн актуалдуулугу татаал рельефтүү, интенсивдүү чөкмө ташуу жана жогорку сейсмикалык шарттарда тоолуу аймактардын гидроэнергетикалык потенциалын өздөштүрүү зарылчылыгы менен шартталган. Гидрологиялык байкоолордун 66 жылдык катарларынын ыктымалдык - статистикалык талдоосунун негизинде жакшыртылган Тянь-Шань компоновкасындагы суу кабыл алуу түйүнүнүн туруктуулугу жана өткөрүмдүүлүгү боюнча эсептөөлөр аткарылган. Гидравликалык жууп тазалоочу бир камералуу чөкмө бактын геометриялык параметрлери негизделди, ал 0,3 ммден ири абразивдик бөлүкчөлөрдү чөктүрүүнү камсыз кылат, бул Crossflow турбиналык жабдууларынын талаптарына шайкеш келет. Гидравликалык моделдөөнүн натыйжалары суу агызуучу элементтердин жалпы өткөрүмдүүлүгү (38,0 м³/с) 1% камсыздуулуктагы текшерүүчү чыгымдан 3,5 % нормативдик запасы менен ашып түшөөрүн тастыктады. Диаметри 1400 мм болот турбиналык трубопроводдун бекемдик мүнөздөмөлөрүнүн верификациясы анын ички басымдын, температуралык деформациялардын жана MSK-64 шкаласы боюнча 9 баллга чейинки сейсмикалык жүктөмдөрдүн айкалышкан таасиринде ишенимдүүлүгүн далилдеди. Иштелип чыккан инженердик чечимдер чөкмөсүз суу кабыл алууну, курулмалардын узакка чыдамдуулугун жана энергообъектини эксплуатациялоонун экономикалык эффективдүүлүгүн камсыз кылат.

Түйүндүү сөздөр: кичи гидроэлектростанциялар; тоо дарыялары; суу кабыл алуу түйүнү; чөкмөлөр; сейсмикалык туруктуулук; гидравликалык эсептөө; деривация; гидротурбина; суу чыгымы; Кыргызстан.

JUSTIFICATION OF CONSTRUCTIVE SOLUTIONS FOR HYDRAULIC STRUCTURES OF SMALL HYDROELECTRIC POWER PLANTS ON MOUNTAIN RIVERS OF THE KYRGYZ REPUBLIC

B.A. Botokanova, D.A. Beishenkulova, M.Zh. Omurzakova

Abstract. The paper presents a scientific and technical justification for the structural solutions of hydraulic structures of a small diversion-type hydropower station in mountainous terrain. The design of small hydropower plants on the rivers of the Kyrgyz Range is complicated by high seismicity of up to 9 points and extreme flow turbidity of up to 20,000 g/m³. An improved layout of the Tien Shan-type intake structure for the Shamsi River is proposed, adapted to these conditions. The geometric parameters of a single-chamber settling basin with hydraulic flushing are justified, ensuring the deposition of abrasive particles larger than 0,3 mm, which meets the requirements of Crossflow turbine equipment. The results of hydraulic modeling confirmed that the total discharge capacity of the spillway elements (38,0 m³/s) exceeds the verification discharge of 1% probability with a normative safety margin of 3,5%. Verification of the strength characteristics of a steel turbine pipeline with a diameter of 1,400 mm proved its reliability under the combined action of internal pressure, thermal deformations, and seismic loads of up to 9 points on the MSK-64 scale. The developed engineering solutions ensure a sediment-free operation mode of the intake structure, durability of the structures, and economic efficiency of the hydraulic structures' operation.

Keywords: small hydropower plants; mountain rivers; water intake structure; sediment; seismic resistance; hydraulic calculation; diversion; hydraulic turbine; water discharge; Kyrgyzstan.

Актуальность исследования. Развитие малой гидроэнергетики (МГЭС) в Кыргызской Республике является стратегическим направлением обеспечения энергетической безопасности и устойчивого развития удалённых регионов. Гидроэнергетический потенциал горных рек страны оценивается в 142 млрд кВт·ч в год, из которых технически доступными являются около 45 млрд кВт·ч [1]. Однако реализация проектов МГЭС в высокогорных условиях сопряжена с комплексом специфических инженерных вызовов, требующих научно обоснованного подхода к проектированию гидротехнических сооружений.

Реки Кыргызского хребта, к которым относится р. Шамси, характеризуются ледниково-снежным питанием, высокими уклонами русла (до 30–50 ‰), значительной изменчивостью стока в течение года и интенсивным транспортом наносов. В период половодья (июль-август) концентрация взвешенных наносов может достигать 20000 г/м³, что создаёт критические условия для эксплуатации гидротурбинного оборудования [2]. Дополнительным фактором риска является высокая сейсмичность региона (до 9 баллов по шкале MSK-64), требующая специальных решений по обеспечению устойчивости сооружений.

Целью исследования являются разработка и научно-техническое обоснование оптимальных конструктивных решений гидротехнических сооружений малых гидроэлектростанций на горных реках Кыргызской Республики на примере МГЭС деривационного типа на реке Шамси (Чуйская область). Работа направлена на обеспечение надёжности, долговечности и экономической эффективности энергообъекта в условиях сложного горного рельефа, а также на реализацию конструктивных решений, обеспечивающих устойчивый водозабор с минимизацией пропуска абразивных наносов при высокой мутности речного стока.

Для реализации поставленной цели в работе последовательно решается комплекс взаимосвязанных инженерных задач:

1. Анализ гидролого-геологических условий створа МГЭС на р. Шамси с оценкой сейсмичности и режима твёрдого стока.
2. Обоснование параметров водозаборного сооружения Тянь-Шаньского типа для минимизации пропуска абразивных наносов в условиях высокой мутности.
3. Расчёт эффективности отстойника для осаждения частиц крупностью > 0,3 мм в соответствии с требованиями турбинного оборудования.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования является проектируемая малая гидроэлектростанция деривационного типа на реке Шамси. Река Шамси представляет собой левобережный приток реки Красная, впадающей в реку Чу. Водосборная площадь в створе водозаборного сооружения составляет 400 км². Бассейн реки расположен в центральной части северного склона Кыргызского хребта и определяет особенности формирования поверхностного стока.

Гидрологический режим реки относится к ледниково-снежному типу питания и характеризуется тремя основными фазами годового стока: весенним снеговым половодьем, летним ледниково-снеговым половодьем и осенне-зимней меженью. Наибольшие значения расходов воды наблюдаются летом, что обусловлено интенсивным таянием сезонного снежного покрова и ледников, обеспечивающим максимальное формирование речного стока.

Для восстановления пропущенных данных в рядах наблюдений поста «Устье р. Сасык» (66 лет) использована корреляционная связь с постом-аналогом. Расчётные расходы уточнены по СНиП 2.01.14-83 с учётом неоднородности ряда, вызванной изменением климата в 2000-х гг., что потребовало введения поправочного коэффициента. Основные параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчётные гидрологические характеристики р. Шамси

Параметры/обозначение	Значение/ед. измерения
Расчётный расход – $Q_{5\ \%}$	23,5 м³/с
Проверочный расход – $Q_{1\ \%}$	36,7 м³/с
Среднемноголетний расход – $Q_{ср}$	23,0 м³/с
Максимальный зафиксированный расход – $Q_{макс}$	51,9 м³/с

Результаты и обсуждение. Выбор рациональной конструктивной схемы головного водозаборного узла для МГЭС на реке Шамси осуществлялся на основе комплексного анализа лимитирующих факторов, выявленных в ходе вероятностно-статистической обработки 66-летних рядов наблюдений гидрометрического поста «устье р. Сасык». Согласно результатам гидрологического расчёта, выполненного по методике СНиП 2.01.14 – 83, река характеризуется высоким коэффициентом внутригодовой неравномерности стока, интенсивным транспортом твёрдых наносов мутность до 20000 г/м³ в селеопасный период и высокой сейсмичностью района строительства до 9 баллов.

Анализ гидрологических характеристик (см. таблицу 1) показал, что применение типовых конструктивных схем не обеспечивает требуемой надёжности в условиях горного рельефа при уклоне русла $i = 0{,}03$. По результатам исследования выбран головной водозаборный гидроузел усовершенствованной Тянь-Шаньской компоновки – низконапорный плотинный гидроузел с береговым водоприёмником (рисунок 1).

Данное решение обосновано следующими техническими преимуществами, согласующимися с данными гидрологического анализа.

Расчётный напор в верхнем бьефе водозаборного гидроузла определён посредством гидравлической зависимости, описывающей изменение пропускной способности водоприёмника в зависимости от действующего напора [1]:

$$H_{Н.П.} = 0,221Q^{0.374}. \quad (1)$$

При этом глубина в верхнем бьефе водозаборного гидроузла составит [2]:

$$H_{р} = 4,5 \times H_{нп}. \quad (2)$$

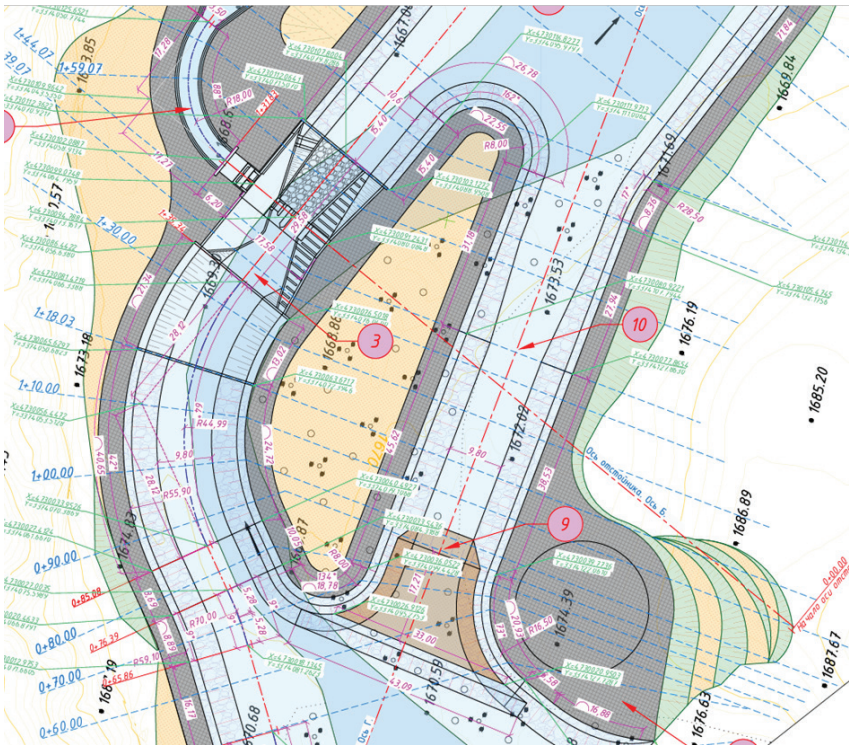


Рисунок 1 – Схема размещения головного водозаборного гидроузла усовершенствованной тянь-шаньской компоновки на участке р. Шамси

Длина наносозащитного порога, определяется из условия обеспечения эффективного регулирования наносного режима водозаборного гидроузла:

$$L_{н.п} = \frac{2H_{нп}}{0,06}. \quad (3)$$

Определение ширины потока по линии уреза воды в подводящем и отводящем регулируемых руслах выполнено с учётом взаимосвязи гидравлических параметров потока и геометрических характеристик русла при расчётном паводковом расходе $Q_{1\%}$-й обеспеченности [3, 4]:

$$B = \frac{2,6}{i^{0,2}}\left(\frac{Q_{1\%}}{\sqrt{g}}\right)^{0,4}. \quad (4)$$

Средние глубины водного потока в руслах определяются согласно рекомендациям [3, 4]:

$$h = \frac{0.3}{i^{0.03}}\left(\frac{Q_{1\%}}{\sqrt{g}}\right)^{0.4}. \quad (5)$$

Радиус кривизны геометрической оси зарегулированного русла:

$$R = \frac{3}{i^{0.5}}\left(\frac{Q_{рус}}{\sqrt{g}}\right)^{0,4}. \quad (6)$$

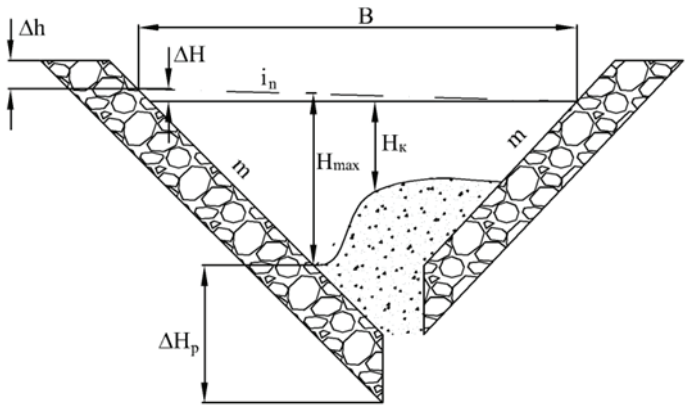


Рисунок 2 – Расчётная схема поперечного сечения криволинейного русла

Максимальную глубину у вогнутого берега криволинейного русла (рисунок 2) рассчитывают из соотношения

$$H_{\max} = \varepsilon \cdot \varepsilon_1 \cdot H . \quad (7)$$

Строительная высота струенаправляющих дамб подводящего регулируемого русла водозабора устанавливается из условия обеспечения расчётного режима движения потока при поверочном расходе и определяется по зависимости

$$H_{стр} = H_{\max} + \Delta h + \Delta H_p + a , \quad (8)$$

где Δh – запас верха струенаправляющей дамбы над максимальным уровнем воды у вогнутого берега, Δh = 0,5÷0,1 м;

$ΔH_р$ – запас низа дамбы от дна воронки размыва, $ΔH_р$ = 1,0÷1,7 м.

Средняя скорость водного потока на прямолинейном участке рек горно-предгорной зоны определяется по формуле [9]

$$v = \frac{Q_i}{Bh} . \quad (9)$$

Максимальный поперечный уклон свободной поверхности потока на криволинейном участке русла определяется при заданных значениях средней скорости течения и радиуса кривизны оси русла в плане по формуле

$$i_n = \frac{v^2}{R \cdot g} . \quad (10)$$

Диаметр камня для крепления откоса определяется из условия устойчивости на размыв [8, 9].

$$d = 0,04 V^2_{русл}. \quad (11)$$

Водоприёмный оголовок водозаборного сооружения размещается в конце криволинейного участка подводящего регулируемого русла. Предельное значение угла поворота криволинейного участка от его начала до створа расположения водоприёмного оголовка определяется по зависимости [3]:

$$\varphi = E \cdot i^{0,15} . \quad (12)$$

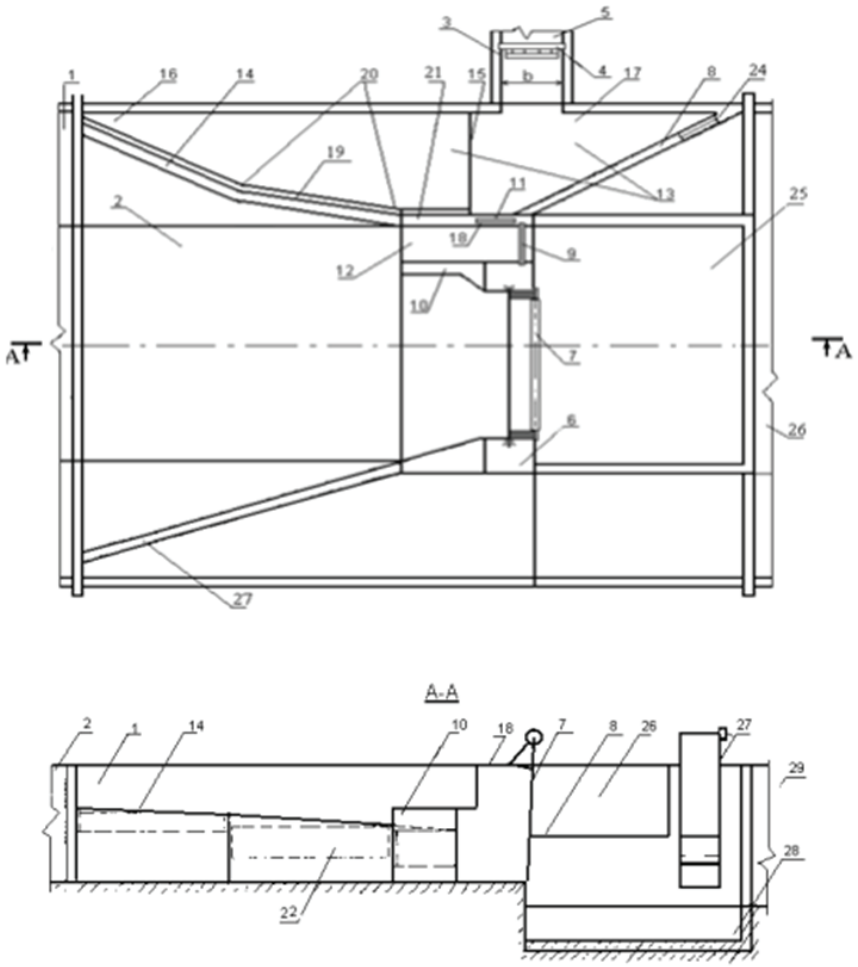


Рисунок 3 – Расчетная схема водозаборного гидроузла для деривационных ГЭС с ломаным в плане наносозащитным порогом

Принятая компоновка водозаборного узла представлена на рисунке 3. Как было установлено ранее [4], расчётная глубина в верхнем бьефе принятой конструкции головного водозаборного сооружения составляет 1,95 м. При пропуске поверочного паводкового расхода уровень воды в верхнем бьефе повышается, при этом максимальная расчётная глубина достигает 2,30 м.

Расчёт водосбросных элементов выполняется на пропуск паводкового расхода при наиболее неблагоприятном гидравлическом режиме, соответствующем максимальной глубине воды в верхнем бьефе. Суммарная пропускная способность водосбросных элементов должна обеспечивать пропуск поверочного расхода $Q_{1\%}$-й обеспеченности, величина которого составляет $Q_{1\%}$ = 36,7 м³/с.

Пропускная способность речного пролёта водозаборного гидроузла, ширина которого принята на основании опыта эксплуатации и составляет 4,0 м, определяется по расчетной зависимости для водослива с широким порогом [4]:

$$Q_{рп} = mB_{р.п}\sqrt{2g}H^{1,5}_{ВБ\,мах}. \quad (2.13)$$

Максимальная расчётная глубина потока в верхнем бьефе сооружения при пропуске паводкового расхода принята равной: $H_{ВБмакс}$ = 2,30 м.

Конструкция с ломаным в плане наносозащитным порогом, (высота ΔР = 1,2 м) и донным промывным трактом обеспечивает эффективный отсек абразивных фракций размером d > 0,30 мм, что критически важно для защиты турбинного оборудования [5, 6].

Реализация усовершенствованной тянь-шаньской компоновки головного узла обеспечивает устойчивый водозабор с коэффициентом свыше 90 % в широком диапазоне расходов, что подтверждается кривыми обеспеченности стока. Ключевым элементом эксплуатационной надёжности в условиях удалённости объекта является применение затвора-автомата уровня верхнего бьефа прямого действия, позволяющего стабилизировать гидравлический режим без применения внешнего привода. Пространственная жёсткость узла при сейсмических воздействиях интенсивностью до 9 баллов гарантируется монолитной железобетонной конструкцией флютбета с гидротехническими зубьями [7, 8].

Гидравлическое подтверждение водосбросного фронта выполнено на пропуск поверочного расхода $Q_{1\%}$-й обеспеченности при максимальной глубине в верхнем бьефе 2,3 м. Расчётная пропускная способность узла составила 38,0 м³/с, что на 3,5 % превышает поверочный расход $Q_{1\%}$. Данный запас, хотя и соответствует нормативам, является минимально допустимым для селеопасных рек. По опыту эксплуатации аналогичных узлов на р. Ала-Арча [8], рекомендуется увеличить ширину промывного тракта на 0,5 м для создания дополнительного резерва при кратковременном интенсивном поступлении наносов.

Данный резерв исключает риск перелива воды через гребень сооружений при прохождении паводков высокой обеспеченности.

Защита турбинного оборудования от абразивного износа достигнута посредством проектирования однокамерного отстойника длиной 60 м. Гидравлический расчёт, исходя из эксплуатационного расхода и скорости осаждения, подтверждает эффективность улавливания частиц крупностью более 0,3 мм, что соответствует требованиям поставщика гидроагрегатов. Оценка периода заиления показала, что при средней мутности потока ресурс отстойника составляет около 190 часов, что допускает эксплуатацию в штатном режиме. В условиях прохождения селевых потоков период заполнения сокращается до 1,4 часа, что требует оперативного перекрытия водоприёмника, предусмотренного алгоритмом автоматизации [9–11].

Анализ деформационного состояния конструкций подтвердил их соответствие установленным требованиям надёжности и безопасности. Расчёт устойчивости плотины против сдвига, выполненный с учётом сейсмического воздействия при сейсмическом коэффициенте γ_c = 0,1, показал коэффициент запаса устойчивости $K_{уст}$ =1,32, что удовлетворяет нормативному требованию для принятого расчётного сочетания нагрузок.

Таким образом, принятая конструктивная схема представляет собой оптимальное инженерное решение, адаптированное к специфическим гидрологическим и геологическим условиям бассейна реки Шамси, обеспечивающее надёжность, долговечность и экономическую эффективность энергообъекта.

Выводы

1. Установлено, что гидролого-геологические условия створа МГЭС на р. Шамси характеризуются высокой сейсмичностью площадки строительства и интенсивным режимом твёрдого стока с мутностью водного потока до 20000 г/м³ в селеопасный период, что требует применения специальных конструктивных мер обеспечения надёжности сооружений.

2. Обосновано применение водозаборного гидроузла усовершенствованной тянь-шаньской компоновки с ломаным в плане наносозащитным порогом высотой 1,2 м, обеспечивающего коэффициент водозабора свыше 90 % в широком диапазоне расходов и эффективное управление абразивными наносами в условиях горного рельефа.

3. Подтверждено расчётным путём, что геометрические параметры однокамерного отстойника длиной 60 м гарантируют осаждение взвешенных частиц крупностью более 0,3 мм, что полностью соответствует требованиям поставщика турбинного оборудования (CINK Hydro-Energy) и снижает риск абразивного износа проточной части гидроагрегатов.

Таким образом, обоснованные конструктивные решения гидротехнических сооружений обеспечивают надёжность, экономическую эффективность и безопасность эксплуатации МГЭС в сложных инженерно-геологических условиях северного склона Кыргызского хребта.

Результаты исследования могут быть рекомендованы для тиражирования при проектировании аналогичных объектов малой гидроэнергетики в горных регионах Центральной Азии

Поступила: 29.07.2026; рецензирована: 12.08.2026; принята: 14.08.2026.

Литература

1. *Лавров Н.П.* Совершенствование речных гидротехнических сооружений Кыргызстана / Н.П. Лавров // Вестник КРСУ. 2019. Т. 19. № 3. С. 45–52. URL: https://www.krsu.edu.kg/vestnik/ (дата обращения: 27.04.2026).
2. *Логинов Г.И.* Гидравлические процессы при водозаборе из малых горных рек / Г.И. Логинов. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2020. 210 с. URL: https://www.krsu.edu.kg/ (дата обращения: 27.04.2026).
3. *Михайлов И.Е.* Современные методы расчёта параметров гравитационных отстойников / И.Е. Михайлов // Гидротехническое строительство. 2020. № 6. С. 41–47. URL: https://www.hydrotech.ru/ (дата обращения: 27.04.2026).
4. *Abilov R.S.* Water intake structures on mountain rivers for small hydropower plants // Power Technology and Engineering. 2023. Vol. 57. No. 3. P. 265–271. URL: https://doi.org/10.1007/s10749-023-01745-2. (дата обращения: 27.04.2026).
5. *Pender G., Li H.* Morphological impacts of sediment extraction in mountain rivers // Earth Surface Processes and Landforms. 2019. Vol. 44. P. 230–245. URL: https://doi.org/10.1002/esp.4493 (дата обращения: 27.04.2026).
6. *Логинов Г.И.* Расчёт конструкции напорного бассейна Көк-Сайской малой ГЭС на реке Куркурею Таласской области / Г.И. Логинов, Б.Б. Курумшиев, М.Т. Таалайбеков. URL: https://www.krsu.edu.kg/ (дата обращения: 27.04.2026).
7. *Мамытов А.Р.* Исследование влияния селевых потоков на работу водозаборных сооружений МГЭС / А.Р. Мамытов, Г.И. Логинов // Наука и новые технологии. 2021. № 2. С. 42–47. URL: http://www.science-journal.kg/ (дата обращения: 27.04.2026).
8. *Сатаров А.К.* Компоновочные решения малых гидроэлектрических станций в высокогорных районах: монография / А.К. Сатаров, Г.И. Логинов. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2020. 185 с. URL: https://www.krsu.edu.kg/ (дата обращения: 27.04.2026).
9. *Жапаров Б.С.* Автоматизация режимов работы малых ГЭС в условиях каскадного регулирования стока / Б.С. Жапаров // Вестник КРСУ. 2024. Т. 24. № 1. С. 55–61. URL: https://www.krsu.edu.kg/vestnik/ (дата обращения: 27.04.2026).
10. *Ботоканова Б.А.* Приоритеты развития малой гидроэнергетики в Кыргызстане / Б.А. Ботоканова, Усон кызы Э., Э.И. Исматиллаев // Вестник КРСУ. 2023. Т. 23. № 8. С. 4–8. URL: https://www.krsu.edu.kg/vestnik/ (дата обращения: 27.04.2026).
11. *Кайыпова Н.У.* Технологическое обоснование при проектировании водозаборного сооружения на реке Ак-Суу / Н.У. Кайыпова, Б.А. Ботоканова, А.К. Шабданов // Вестник КРСУ. 2023. Т. 23,. № 8. С. 82–89. URL: https://www.krsu.edu.kg/vestnik/ (дата обращения: 27.04.2026).