

Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-4-81-88>

УДК 626.8:532.54



ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСШИРЯЮЩЕГОСЯ ВОДОБОЯ С ГАСИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ БЕЗЭРОЗИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ ЗА ТРУБЧАТЫМ ВОДОСБРОСОМ

О.Н. Черных^{1✉}, А.В. Бурлаченко², Я.Ю. Бурлаченко¹

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

² Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ); 125319, г. Москва, Ленинградский пр-кт, 64, Россия

Аннотация. Изложены результаты гидравлических и гидродинамических исследований расширяющегося водобойного участка нижнего бьефа с комплектом гасителей энергии, обеспечивающих необходимую энергогасящую способность, формирующих благоприятный режим течения за гидроузлом и позволяющих бороться со сбоем потока, несмотря на условия кавитации и значительные пульсационные нагрузки в начальной части водобоя 4-пролетного трубчатого водосброса. Оптимизация конструктивных элементов выходного оголовка позволит при реализации модернизированного аванпроекта после принятия решения о возобновлении строительства Нижне-Кафирниганского гидроузла обеспечить надежную работу его нижнего бьефа независимо от стадии кавитации и от изменения спектров и величины пульсации давления в отдельных точках и на локальных участках водобоя, стабилизировать движение потока в отводящем русле.

Работа выполнена в рамках соглашения № 075-15-2025-543 от 16.06.2025

Ключевые слова: 4-пролетный водосброс, противокавитационная защита, расширяющийся водобой, сбой потока, пульсация давления

Формат цитирования: Черных О.Н., Бурлаченко А.В., Бурлаченко Я.Ю. Гидродинамические исследования расширяющегося водобоя с гасителями энергии безэрозионной конструкции за трубчатым водосбросом // Природообустройство. 2025. № 4. С. 81-88. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-4-81-88>

Scientific article

HYDRODYNAMIC STUDIES OF AN EXPANDING APRON WITH ENERGY ABSORBERS OF AN EROSION-FREE STRUCTURE BEHIND A TUBULAR SPILLWAY

O.N. Chernykh^{1✉}, A.V. Burlachenko², Ya.Yu. Burlachenko¹

¹ Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy; A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russia

² Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 125319, Moscow, Leningradsky prospect, 64, Russia

Abstract. The article presents the results of hydraulic and hydrodynamic studies of the expanding stilling section of the lower pool with a set of energy absorbers that provide the necessary energy-absorbing capacity, form a favorable flow regime behind the hydraulic structure and allow to combat flow failure, despite the cavitation conditions and significant pulsation loads in the initial part of the stilling section of the four-span tubular spillway. Optimization of the design elements of the outlet head will allow, when implementing the modernized preliminary design after the decision is made to resume construction of the Nizhne-Kafirnigansky hydraulic structure, to ensure reliable operation of its lower pool regardless of either the cavitation stage or changes in the spectra and magnitude of pressure pulsation at individual points and local sections of the stilling section, and to stabilize the flow in the outlet channel.

This study was carried out under agreement No. 075-15-2025-543 dated 16.06.2025

Keywords: four-span spillway, anti-cavitation protection, expanding apron, flow failure, pressure pulsation

Format of citation: Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Burlachenko Ya.Yu. Hydrodynamic studies of an expanding apron with energy absorbers of an erosion-free structure behind a tubular spillway // Prirodoobustroystvo. 2025. № 4. P. 81-88. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-4-81-88>

Введение. Решение проблем государств, обладающих внушительными гидроэнергетическими ресурсами (таких, например, как Таджикистан (527 млрд кВт·ч в год, занимающий по этому показателю 8-е место в мире), связано со строительством крупных комплексных гидроузлов. Гидроэнергетический потенциал Республики Таджикистан в 3 раза выше, чем текущее потребление электроэнергии по всей Центральной Азии. Здесь сейчас действуют 11 крупных и средних ГЭС, около 300 малых ГЭС, общая установленная мощность которых оценивается в 132 МВт. По оценкам международных специалистов, в регионе существует 6 створов, выгодных для строительства ГЭС с водохранилищами. Одним из них является Нижне-Кафирниганский гидроузел с планируемым максимальным объемом водохранилища 2,05 км³, установленной мощностью 150 МВт, выработкой 0,6 млрд кВт·ч в год.

Проектирование Нижне-Кафирниганского гидроузла началось в 80-е гг. Проект строительства уникального водохозяйственного объекта с водохранилищем сезонного регулирования был выполнен Институтом Союзгипроводхоз при участии ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова, Среднеазиатского НТИ им. В.Д. Журина, МГУ им. М.В. Ломоносова, Института сейсмологии АН Таджикистана, Института Таджикгипроводхоз и других научных и проектных институтов СССР. Завершение строительства первой очереди гидроузла с водохранилищем емкостью 360 млн м³ было запланировано на 1993 г. В прогнозируемой зоне орошения находятся около 146,2 тыс. га земель, пригодных для него, из которых сейчас орошаются лишь 42,7 тыс. га.

Цель исследований: Экспериментальное изучение расширяющегося водобойного участка

нижнего бьефа с комплектом гасителей энергии, обеспечивающих необходимую энергогасящую способность, формирующих благоприятный режим течения за гидроузлом и позволяющих бороться со сбоем потока, несмотря на условия кавитации и значительные пульсационные нагрузки в начальной части водобоя 4-пролетного трубчатого водосброса.

Материалы и методы исследований. Строительство поселка для гидростроителей Нижне-Кафирниганского гидроузла в соответствии с проектом было начато еще в 1983 г. на берегу р. Кафирниган (правый приток р. Амударья) (рис. 1). Река берет начало с южных склонов Гиссарского хребта, имеет длину 387 км, площадь бассейна – 11,6 тыс. км², средний расход воды – 156 м³/с.

В поселке до Дня независимости 9 сентября 1991 г. были построены 54 дома (из 100 планированных), несколько магазинов, подъездные дороги, мост через реку, притрассовые автобазы, мастерские, бетонный и асфальтный заводы, сейсмологическая станция; были решены вопросы энерго- и водоснабжения. На самом гидроузле до распада СССР и начала гражданской войны в Таджикистане в 1992 г., когда практически все специалисты покинули Таджикистан, были начаты вскрышные работы под основные сооружения, работы по выносу из зоны затопления и перезахоронению старых кладбищ и скотомогильников; построен вахтовый поселок для управления строительством и группы рабочего проектирования. В состав гидроузла, защищающего нижележащие земли от возможного паводка, вошли: плотина из местных материалов с экраном из асфальтобетона длиной 1600 м; донный трубчатый водосброс; ирригационный



а



б

Рис. 1. Створ гидроузла и полуразрушенный поселок со строительной площадкой Нижне-Кафирниганского гидроузла, заложенный в 1983 г. (фото Asia-Plus)

Fig. 1. The hydroelectric complex site and a dilapidated village next to the construction site of the Nizhne-Kafirniyan hydroelectric complex, founded in 1983 (photo Asia-Plus)

водовыпуск; катастрофический водосброс на расход $650 \text{ м}^3/\text{с}$; ГЭС, работающая несколько месяцев в году, мощностью 80 тыс. кВт·ч. при сезонном колебании 10...110 тыс. кВт и среднегодовой выработкой электроэнергии 478 тыс. кВт·ч. Срок окупаемости капитальных вложений составлял около 4,6 года. В районе строительства и освоения земель ранее, и особенно сегодня, – огромный избыток трудовых ресурсов (примерно 49% населения). В течение всех 32 лет независимости на ввод новых земель и на улучшение водообеспеченности денег в республике Таджикистан не было, но сейчас есть планы обратиться за помощью к Узбекистану, где сохранились специалисты, Китаю и к другим странам за технической и финансовой помощью.

Результаты и их обсуждение. Анализ технических решений водосбросов гидроузлов комплексного назначения показывает, что практически ни одна из конструкций нижнего бьефа малопролетных трубчатых водопропускных сооружений не работает благоприятно с точки зрения гашения и растекания потока, если не предусмотреть систему гасителей, расщепителей и растекателей, состоящую из одного, двух, трех и более рядов [1]. Для дальнейшего совершенствования конструкций креплений открытых малопролетных сооружений, а также для разработки новых методов расчетного обоснования параметров гасящих устройств необходимо выполнять многофакторные лабораторные и натурные исследования гидравлических и динамических условий работы их нижних бьефов.

При гидродинамических исследованиях 4-очкового трубчатого водосброса (водовыпуска) Нижне-Кафирниганского гидроузла, выполненного ранее в рамках аванпроекта [1-3, 5], было установлено, что его нижний бьеф не обеспечивает эффективного гашения энергии и растекания потока при пропуске основных эксплуатационных и паводковых расходов. В состав водосброса входит башня высотой 70 м, затворные камеры, 4 трубы длиной 230 м. Первоначально крепление нижнего бьефа в концевой части водосброса было запроектировано по типу раструбного водобойного колодца. Расчетный расход водосброса составляет $1290 \text{ м}^3/\text{с}$. В концевой части водосброс представляет собой 4-пролетную трубу, выходящую в расширяющийся в плане водобойный колодец с центральным углом 20° .

Анализ результатов гидравлических исследований проектного варианта крепления проводился с учетом опыта лабораторного проектирования креплений, накопленного в лабораторном комплексе кафедры гидросооружений

ИМВХС имени А.Н. Костякова по малопролетным водосбросным сооружениям [4-6], а также по изучению кавитационной обстановки в зоне гасителей энергии потока [5, 8-10]. Поскольку перед первым рядом гасителей ожидалась скорость потока более 24 м/с , что указывало на возможность именно их выступать в качестве источника появления срывной кавитации, способной разрушить поверхности гасителей при эксплуатации, был рассмотрен ряд вариантов «безэрозионной» формы гасителей-растекателей и порогов-стенок.

Исследования проводились при числах Фруда, подсчитанных для сжатого сечения $Fr = 51...190$ и Рейнольдса $Re = 412000...527000$. При проведении гидродинамических экспериментов пульсационные давления измерялись в 30 точках водобойного колодца. Использовались индукционные точечные датчики давления мембранного типа диаметром 6 мм, рассчитанные на максимальное давление 30 см в.ст. (рис. 2), и апробированная блок-схема контрольно-измерительной аппаратуры с соответствующим программным обеспечением. Статическая составляющая фиксировалась в 42 точках пьезометрами. Все частотные и амплитудные характеристики выдавались в числовом виде в необходимых диапазонах. Для частотного диапазона от 0,2 Гц спектральные плотности регистрировались с погрешностью менее 2 дБ, среднеквадратичная ошибка измерений составляла 4%.

Многофакторные исследования проводились на пространственной гидравлической модели водосброса Нижне-Кафирниганского гидроузла, выполненной с линейным масштабом 1:60, и анализировались данные, полученные на фрагментной модели в вакуумном стенде, основные параметры которого приведены в работе [1]. В проведении этих исследований под руководством

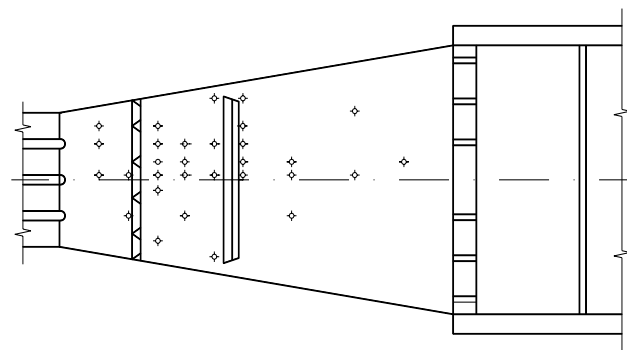


Рис. 2. Схема расположения датчиков давления ДДМ-6 на дне водобоя с рекомендуемой схемой гасящих устройств

Fig. 2. Layout of the DDM-6 pressure sensors at the bottom of the apron with the recommended layout of the damping devices

профессора, доктора технических наук Н.П. Розанова принимали участие кандидаты технических наук Н.Н. Розанова, А.Г. Журавлёва, А.Р. Ариель [2, 4], а также Б.М. Обидов [3]. Применение гасителей энергии для данных условий по сравнению с обычным водобойным колодцем позволяет существенно уменьшить заглубление водобоя при обеспечении благоприятных гидравлических режимов в нижнем бьефе практически при всех режимах работы труб водосброса. При этом гасители энергии в значительной степени выполняют и функции растекателей потока.

В результате исследований установлено, что в нижнем бьефе гидроузла гашение избыточной энергии потока, хорошее растекание и бессбойная работа при любых вариантах эксплуатационных сбросов (симметричных и несимметричных) достигаются следующими конструктивными мероприятиями: *а* – установкой на оси каждого из четырех пролетов на расстоянии 15 м от начала колодца, треугольных в плане безэрозионных растекателей с наклонным верхним основанием (заложение – 1:2,3), причем своим нижним основанием растекатели опираются на противокавитационный порожек максимальной высотой 0,3 м с обратным уклоном по ходу течения; *б* – расположением рассеивающего порога на расстоянии 33 м от начала водобоя, причем все грани потока, кроме лобовой, в целях усиления его противокавитационной защиты устроены как наклонные с заложением 1:2,3, по бокам порога имеются противокавитационные порожки максимальной высотой 2,8 м;

в – устройством на выходном ребре водобойного колодца 6 расщепителей высотой 2 м, толщиной 1 м; *г* – размещением позади расщепителей на расстоянии 30 м от выходного ребра колодца, а на рисберме – дополнительной водобойной стенки высотой 0,9 м. Все это вкуче способствовало улучшению распределения потока по ширине, его стабилизации и повышению эффективности системы гашения за концевым сечением.

Результатом лабораторного проектирования и последующих экспериментальных проверок явилась конструкция крепления нижнего бьефа, представленная на рисунке 3. Сопряжение бьефов в пределах этого крепления осуществляется с помощью трех гидравлических прыжков: первого – перед треугольными растекателями; второго – в конце колодца вслед за распределительным порогом; третьего – между выходным ребром колодца и малой водобойной стенкой. Второй и третий прыжки при несимметричных режимах сброса имеют криволинейный фронт, однако режим течения в отводящем канале за пределами крепления является достаточно благоприятным.

Осредненное давление и нагрузка определялись высотой пьезометрической линии над отметкой дна водобоя. Во всех возможных эксплуатационных случаях наблюдалось идентичное распределение давления вдоль крепления: перед гасителями – повышение, за ними – резкое понижение значения давления, а далее – опять повышение перед сплошной стенкой. Наибольший перепад был при закрытии трубы ГЭС и работе

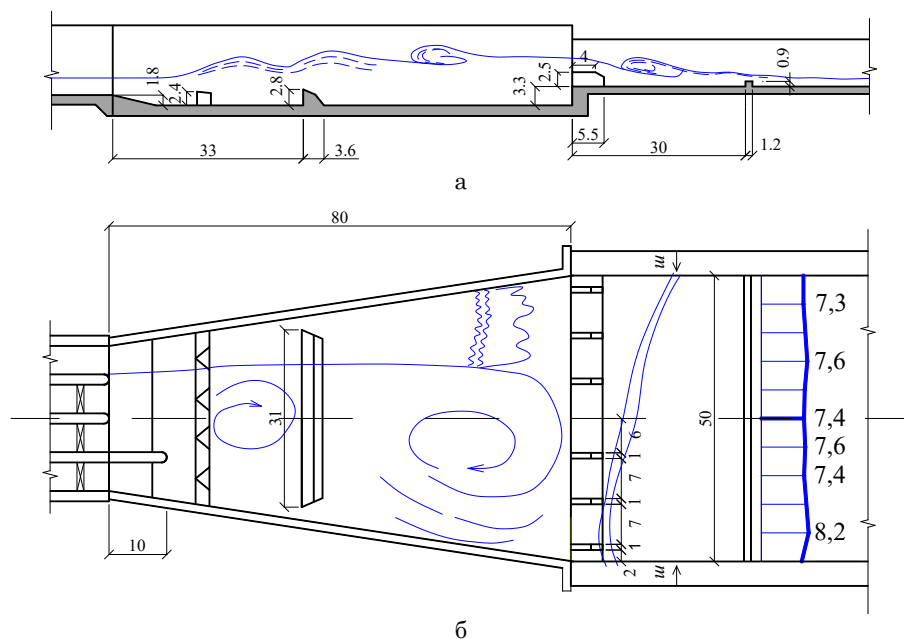


Рис. 3. Продольный разрез по оси выходного участка (а) и план течений на водобое с эпюрой скоростей на рисберме при работе только одной левой трубы водосброса (б)
Fig. 3. Longitudinal section along the axis of the outlet section (a) and the flows plan on the apron with the velocity diagram on the apron when only one left spillway pipe is operating (b)

трех остальных смежных труб, когда его величина составляла $0,55 (\rho V_1^2/2)$, или в натуре – 16,6 м в.ст., V_1 – скорость на выходе из труб. Перед сплошной стенкой давление было выше, чем глубина нижнего бьефа, и достигало в среднем $0,46 (\rho V_1^2/2)$. На участке от сплошной до прорезной стенки на пороге водобоя пьезометрический уровень практически постоянен – горизонтальный. Его значение составляет $(0,23...0,27) (\rho V_1^2/2)$. За прорезной стенкой в зоне третьего вальца наблюдается местное понижение давления, которое на длине $l/h_1 = 25$ (h_1 – глубина на выходе из труб) соответствует уровню воды в нижнем бьефе. Распределение давления по ширине при симметричной работе пролетов относительно равномерное. При несимметричной работе наиболее неравномерное распределение происходит перед первым рядом гасителей, а за гасителями эпюра выравнивается, достигая горизонтального распределения.

Области пониженного давления захватывают первый ряд плит (первая плита подвержена знакопеременной нагрузке) и распространяются на начальный участок второго ряда плит. Если предполагать, что давление под плитой равно давлению нижнего бьефа, то наибольшие дефициты давления в расчетных режимах будут испытывать плиты за первым и вторым рядами гасителей. При работе сооружения неполным числом пролетов за гасителями первого и второго рядов появляется сбой потока, который ведет к некоторому перераспределению средних давлений. Максимальный дефицит наблюдается по оси сбойного течения в зоне свала струй. Местное повышение давления появляется у противоположного борта величиной 10...15 м в.ст. при работе сооружения двумя или тремя отверстиями. Перед гасителями третьего ряда эпюры давления и скорости выравниваются.

Поскольку в натуре при наличии кавитации коэффициенты лобового сопротивления гасителей энергии первого ряда C будут меньше, чем на обычной гидравлической модели (не в вакуумном стенде, как рассматривалось в работах [1-5]), это необходимо учитывать и в гидравлических исследованиях, и в гидродинамических расчетах при оценке величины суммарной нагрузки. Корректно это можно сделать, используя несколько способов [1, 5, 7]. Например, кавитирующие в натурных условиях гасители можно заменить при моделировании аналогичными гасителями, но с площадью миделевого сечения ω , уменьшенной в C_o/C_k раз, где C_o и C_k – коэффициенты лобового сопротивления гасителя C соответственно при бескавитационном режиме ($\beta > 1$) и при данной стадии кавитации ($\beta = K/K_{кр}$);

C – коэффициент формулы для реакции гасителя $R = \gamma \omega C V_{наб}^2 / 2g$ с общеизвестными значениями [1, 7, 11]. При использовании этого способа одновременно для гасителей первого ряда дополнительно проводились опыты и с гасителями уменьшенных сечений, чтобы быть уверенными в том, что изменения этих сечений практически не влияют на структуру потока. Полученные значения коэффициентов сопротивления C_o исследованных гасителей энергии хорошо согласуются с данными, отраженными в работе [1], и когда исследования проводились с применением плиты-датчика, позволявшей определить реакции гасителей и коэффициент пульсации нагрузки [5]. Установлено, что коэффициент пульсации нагрузки увеличивается по мере развития кавитации (рис. 4), а при $\beta < 0,5$ намечается тенденция его снижения [5, 7].

Влияние стадии кавитации β на коэффициент пульсации нагрузки δ_n хорошо прослеживается на данных рисунка 5. При работе гасителей в условиях кавитации, как начальной, так и развивающейся, мгновенная составляющая нагрузки увеличивается (по мере уменьшения осредненной нагрузки) по сравнению с бескавитационным режимом [3]. В бескавитационном режиме коэффициент пульсации нагрузки $\delta_n = \pm A / (V^2 / 2g)$, где A – амплитуда пульсации нагрузки на единицу площади миделевого сечения; $V^2 / 2g$ – скоростной напор от скорости набегающего на гаситель. Он постоянен и равен для безэрозионных гасителей первого ряда: $\delta_n = 0,061... 0,11$. В начальной стадии кавитации его значение возрастает и достигает при $\beta = 0,5$; $\delta_n = 0,65$ (рис. 5). Интенсивность процесса возрастания коэффициента пульсации

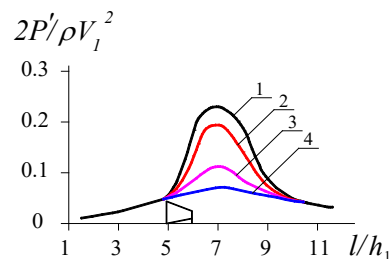


Рис. 4. Изменение относительных стандартов пульсации давления вдоль течения на дне водобоя за первым рядом гасителей безэрозионных очертаний при разных стадиях кавитации β :

1 – $\beta = 0,5$; 2 – $\beta = 0,7$;

3 при – $\beta > 1$ – отсутствие кавитации; 4 – $\beta = 0,2$

Fig. 4. Change in relative standards of pressure pulsation along the flow at the bottom of the apron behind the first row of erosion-free dampers at different stages of cavitation

β : 1 – $\beta = 0,5$; 2 – $\beta = 0,7$;

3 at – $\beta > 1$ – no cavitation; 4 – $\beta = 0,2$

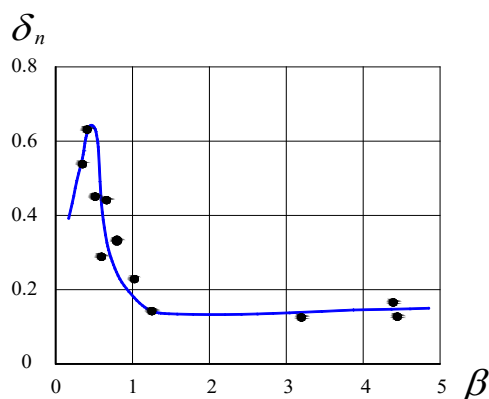


Рис. 5. Графическая зависимость коэффициента пульсации $\delta_n = f(\beta)$ для гасителей безэрозионных конструкций
Fig. 5. Graphic dependence of the pulsation coefficient $\delta_n = f(\beta)$ for erosion-free dampers

связана с образованием здесь естественного очага возмущений – кавитационного факела, содержащего огромное количество схлопывающихся и пульсирующих пузырьков. Уменьшение размахов пульсации на некоторой стадии кавитации при наличии «кавитационного порога», препятствующего понижению абсолютного давления ниже давления водяных паров жидкости, было отмечено и В.М. Лятхером [7, 12].

Распределение интенсивности пульсации давления P' на участке перед первым рядом гасителей соответствует известным экспериментальным данным для плоского прыжка [1]. Значение P' здесь составляет около 0,06 ($\rho V_1^2/2$), кроме режима с одной работающей трубой, что объясняется резким уменьшением удельных расходов и скоростей в сжатом сечении. Наибольшие значения P' наблюдаются за первым рядом гасителей (безэрозионными пашками) на расстоянии $(0,55 \dots 1,0) h_1$ и достигают в строительный период 0,2 ($\rho V_1^2/2$), в эксплуатационный – 0,145 ($\rho V_1^2/2$) в том же створе. Наибольшее значение P' имеет место

в зоне свала струй, когда работают только 2 средние трубы водосброса, – 0,245 ($\rho V_1^2/2$). На участке между первым и вторым рядами гасителей величина пульсации давления составляет от 0,2 до 0,04 ($\rho V_1^2/2$), что несколько выше обычных данных для плоского прыжка [12]. Это объясняется влиянием пространственности и тем, что скорость в сжатом сечении не является равной скорости на выходе из труб. Большое значение P' за растекателями связано с эффектами пространственного обтекания зубьев, то есть с процессом интенсивного вихреобразования за ними. По мере приближения к сплошной стенке интенсивность пульсации падает до 0,04, а за ней вплоть до прорезной стенки на пороге $P' = 0,03$ ($\rho V_1^2/2$), и затухает она медленнее (рис. 6).

При работе сооружения в строительный период на участке от сплошной стенки до прорезной на пороге колодца величина P' в среднем составляет 0,06 ($\rho V_1^2/2$), то есть выше, чем в расчетном режиме при работе четырех труб полностью, причем значения P' перед прорезной стенкой увеличиваются (что отмечается при переходе от донного к поверхностному режиму сопряжения и для схемы, когда на расширяющемся водобое устанавливаются рассеивающие пороги и водобойные стенки). Наиболее загруженной оказывается центральная часть плиты первого ряда. При работе сооружения тремя пролетами область с максимальными значениями P' смещается к оси пролета смежного с закрытым. При этом $P'_{\max} = 0,16$ ($\rho V_1^2/2$), а за сплошной стенкой значения P' снижаются до $0,03\rho V_1^2/2$.

Данные о стандартах пульсации, обработанные с целью получения изолиний (рис. 7), также показали, что концентрация значений стандартов пульсации давления наблюдается на средней части именно первой плиты за растекателями, у бортов значения P' уменьшаются.

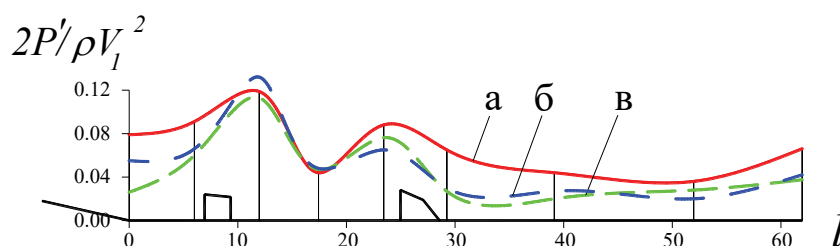


Рис. 6. Характерное распределение относительных стандартов пульсации давления в точках дна водобойного колодца $2P' (\rho V_1^2/2)$ при пропуске в расчетном режиме расхода $Q = 1290 \text{ м}^3/\text{с}$ четырьмя трубами:

соответственно в продольном створе между безэрозионными гасителями первого ряда (а); для плоского прыжка [12] (б); по оси гасителя (в)

Fig. 6. Characteristic distribution of relative pressure pulsation standards at the bottom points of a stilling basin $2P' (\rho V_1^2/2)$ when passing a flow rate of $Q = 1290 \text{ м}^3/\text{с}$ in the design mode through 4 pipes: respectively, in the longitudinal section between the erosion-free dampers of the 1st row (a), for a flat jump [12] (b) and along the damper axis (c)

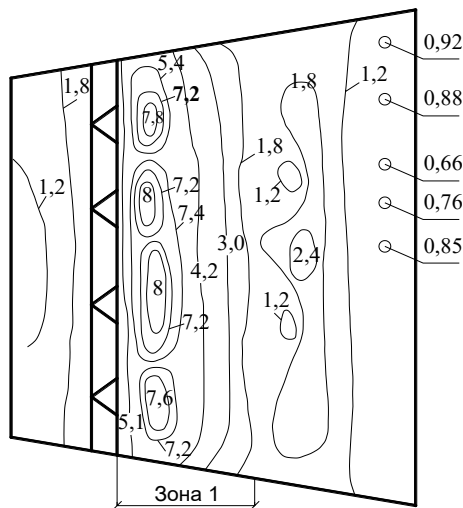


Рис. 7. Изолинии стандартов пульсации давления P' с учетом влияния кавитации, м в.ст. «натурь»: 1 – зона, где учтено влияние кавитации

Fig. 7. Isolines of pressure pulsation standards P' taking into account the influence of cavitation, m V. Natura station:

1 is the zone where the influence of cavitation is taken into account

Перед сплошной стенкой в некоторых режимах еще имеют место локальные области с повышенными значениями P' .

В целом при работе в аварийных режимах значения стандарта пульсации на плитах первого и второго рядов меньше, чем при работе в расчетных режимах. Поэтому при определении параметров плит следует делать расчет на основной режим при пропуске расхода $1290 \text{ м}^3/\text{с}$ всеми четырьмя трубами при УВБ = 525 м. В дальнейшем для повышения устойчивости плит (или если потребуется – для уменьшения толщины

плит) можно рекомендовать устроить дренажные колодцы специальной конструкции, стабилизирующей поступление пульсаций в подплитную область, в местах максимального понижения давления: за гасителями первого ряда – на расстоянии $(1...2) h_p$, за вторым рядом гасителей – на расстоянии $0,5 h_p$.

Выводы

Возобновление строительства Нижне-Кафирниганского гидроузла с водохранилищем сезонного регулирования будет способствовать улучшению обеспечения водой, увеличению площади орошаемых земель не только Таджикистана, но и соседнего Узбекистана. Для продолжения возведения ирригационного гидроузла с оптимизированными современными решениями желательно учесть результаты гибридного моделирования гидродинамических процессов, исследованных на пространственных моделях при лабораторном проектировании устройств нижнего бьефа водосброса. Максимальные пульсационные составляющие нагрузок на плиты водобоя наблюдаются при развитой стадии кавитации и могут превысить в отдельных точках нагрузку в бескавитационном режиме работы не менее чем в 2 раза. Створ с максимальными пульсационными нагрузками находится за гасителями с безэрозионной формой очертания на расстоянии примерно $0,5...1,5$ глубины потока на выходе из труб.

Предложенные подходы не только способствуют эффективному гашению энергии потока, но и гарантируют бесбойные режимы в отводящем русле, надежную эксплуатацию в условиях пропуска максимального расхода через трубчатый водосброс Нижне-Кафирниганского гидроузла.

Список использованных источников

1. Розанов Н.П. Устройства нижнего бьефа водосборов: монография / Н.П. Розанов, Н.Т. Кавешников, В.И. Китов; Под ред. проф. Н.П. Розанова. М.: Колос, 1984. 269 с.
2. Rozanov N.P., Rumiantsev J.S., Rozanova N.N., Kaveshnikov N.T., Kitov E.I., Bukreiev V.P., Chernykh O.N., Chechonadskikh V.S. Rational Types and Designing of Tailwater arrangements in open spillways. Spillway Tunnels and Culvert-type spillways. International Comission on Large Dams, XIII Congress, New-Delhi, India, 1979.
3. Obidov B., Vokhidov O., Shodiev B., Ashirov B., Sarsaeva M. (2020) Hydrodynamic loads on a water drain with cavitation quenchers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 883. Pp. 012011. DOI:10.1088/1757-899x/883/1/012011
4. Rozanov N.P., Rozanova N.N. Some probleme of modelling water outlet structures with free-surface (Subject Da-c). XIX JAHR congress New-Delhi, India, 1981, Proceeding Subject – D(a), Paper № 10, Volume V.
5. Розанова Н.Н. Кавитационные и гидравлические исследования безэрозионных гасителей энергии

References

1. Rozanov N.P. et al. Spillway tailrace devices: monograph / N.P. Rozanov, N.T. Kaveshnikov, V.I. Kitov; Ed. by prof. N.P. Rozanov. Moscow: Kolos, 1984. 269 p.
2. Rozanov N.P., Rumiantsev J.S., Rozanova N.N., Kaveshnikov N.T., Kitov E.I., Bukreiev V.P., Chernykh O.N., Chechonadskikh V.S. Rational Types and Designing of Tailwater arrangements in open spillways. Spillway Tunnels and Culvert-type spillways. International Comission on Large Dams, XIII Congress, New-Delhi, India, 1979.
3. Obidov B., Vokhidov O., Shodiev B., Ashirov B., Sarsaeva M. (2020) Hydrodynamic loads on a water drain with cavitation quenchers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 883. P. 012011. DOI:10.1088/1757-899x/883/1/012011
4. Rozanov N.P., Rozanova N.N. Some probleme of modelling water outlet structures with free-surface (Subject Da-c). XIX JAHR congress New-Delhi, India, 1981, Proceeding Subject – D(a), Paper № 10, Volume V.
5. Rozanova N.N., Ariel A.R. Cavitation and hydraulic studies of erosion-free energy absorbers / Collection

/ Н.Н. Розанова, А.Р. Ариэль / Сборник научных трудов. Натурные и модельные исследования гидротехнических сооружений. М.: 1983. С. 75-81.

6. Burlachenko A.V., Burlachenko Y.Y., Brakeni A., Chernykh O.N. (2024). Ensure the stability of the water retention plates of hydraulic structure, Larhyss Journal, No. 58, pp. 73-87.

7. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: Справочное пособие / Под ред. Д.Д. Лаппо. М.: Энергоатомиздат, 1988. 624 с.

8. Черных О.Н. Экспериментальные и аналитические исследования нагрузок на элементы крепления за водосбросами водных объектов АПК / О.Н. Черных, А.В. Бурлаченко, С.Ю. Бурлаченко // Природообустройство. 2023. № 4. С. 12-20. EDN: MQRVMW

9. Chernykh O.N., Komelkov L.V. Hydrodynamic loads and stability of the lower-pool apron of hydraulic structures // Hydrotechnical Construction. 1983. Vol. 17 (8). Pp. 410-416.

10. Burlachenko A.V., Chernykh O.N., Brakeni A. Operation evaluation of water discharge end sections in the conditions of narrow downthrow // Larhyss Journal. 2023. No. 56. Pp. 25-38.

11. Водопропускные гидротехнические сооружения (водосбросные, водоспускные и водовыпускные). Правила проектирования. Свод правил. СП 290. 1325800, п. 4.11. 2016. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456074911>.

12. Лятхер В.М. Турбулентность в гидросооружениях: монография. М.: Энергия. 1968. 408 с.

13. Черных О.Н. Обеспечение надежности крепления из плит за водопропускными сооружениями мелиоративных систем АПК // О.Н. Черных, А.В. Бурлаченко, С.Ю. Бурлаченко // Природообустройство. 2023. № 5. С. 41-46. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-5-40-46>

14. Алсадек Е.С. Крепления в нижнем бьефе шахтного водосброса гидроузла «16 Тишрин» // Природообустройство. 2024. № 3. С. 63-70. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-3-63-70>

15. Dilshod Bazarov, Nikolai Vatin, Obidov Bakhtiyor, Vokhidov Oybek, Ashraf Rakhimov and Makhfuz Akhmedi. Hydrodynamic effects of the flow on the slab of the stand in the presence of cavitation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IPICSE2020. 1030 (2021) 012116 doi:10.1088/1757-99X/1030/1/012116

of scientific papers. Natural and model studies of hydraulic structures, Moscow: 1983. P. 75-81.

6. Burlachenko A.V., Burlachenko Y.Y., Brakeni A., Chernykh O.N. (2024). Ensure the stability of the water retention plates of hydraulic structure, Larhyss Journal, No. 58, P. 73-87.

7. Hydraulic calculations of spillway hydraulic structures: Reference manual / Ed. D.D. Lappo. M.: Energoatomizdat, 1988. 624 p.

8. Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Burlachenko Ya.Yu. Experimental and analytical studies of loads on fastening elements behind spillways of water bodies of the agro-industrial complex // Prirodoobustroystvo. 2023. No. 4. P. 12-20. EDN: MQRVMW

9. Chernykh O.N., Komelkov L.V. Hydrodynamic loads and stability of the lower-pool apron of hydraulic structures // Hydrotechnical Construction. 1983. Vol. 17 (8). P. 410-416.

10. Burlachenko A.V., Chernykh O.N., Brakeni A. Operation evaluation of water discharge end sections in the conditions of narrow downthrow // Larhyss Journal. 2023. No. 56. P. 25-38.

11. Culvert hydraulic structures (spillways, water outlets and water discharges). Design rules. Code of rules. SP 290. 1325800, p. 4.11. 2016. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456074911>.

12. Lyather V.M. Turbulence in hydraulic structures: monograph. Moscow: Energiya. 1968. 408 p.

13. Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Burlachenko Ya.Yu. Ensuring the reliability of fastening from slabs behind culverts of melioration systems of the agro-industrial complex // Prirodoobustroystvo / 2023. No. 5. P. 41-46. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-5-40-46>

14. Alsadek E.S. Fastenings in the lower pool of the mine spillway of the "16 Tishrin" hydroelectric complex // Prirodoobustroystvo / 2024. No. 3. P. 63-70 <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-3-63-70>

15. Dilshod Bazarov, Nikolai Vatin, Obidov Bakhtiyor, Vokhidov Oybek, Ashraf Rakhimov and Makhfuz Akhmedi. Hydrodynamic effects of the flow on the slab of the stand in the presence of cavitation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IPICSE2020. 1030 (2021) 012116 doi:10.1088/1757-99X/1030/1/012116

Об авторах

Ольга Николаевна Черных, канд. техн. наук, доцент; WoSResearcherID: S-2542-2018; Scopus AuthorID: 57213261727; ORCID: 0000-0003-2905-446X; SPIN-код: 7757-7969; AuthorID: 692667; chernih@rgau-msha.ru

Алёна Владимировна Бурлаченко, канд. техн. наук, доцент; WoSResearcherID: HPE-1499-2023; Scopus AuthorID: 57191856023; ORCID: 0000-0003-2617-9515, SPIN-код: 3155-2490; AuthorID: 1098780; chtara@mail.ru

Ярослав Юрьевич Бурлаченко, соискатель; yaroslav.burlachenko@sneak-mail.ru

About the authors

Olga N. Chernykh, CSc (Eng), associate professor WoS ResearcherID: S-2542-2018; Scopus AuthorID: 57213261727; ORCID: 0000-0003-2905-446X; SPIN-code: 7757-7969; AuthorID: 692667; chernih@rgau-msha.ru

Alena V. Burlachenko, CSc (Eng), associate professor; WoSResearcherID: HPE-1499-2023; Scopus AuthorID: 57191856023; ORCID: 0000-0003-2617-9515, SPIN-code: 3155-2490; AuthorID: 1098780; chtara@mail.ru

Yaroslav Yu. Burlachenko, the applicant; yaroslav.burlachenko@sneak-mail.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Черных О.Н., Бурлаченко А.В., Бурлаченко Я.Ю. выполнили теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов / The authors declare that there are no conflicts of interests

Вклад авторов / Contribution of authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All the authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 22.04.2025

Поступила после рецензирования / Revised after peer review 20.06.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 20.06.2025

Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Burlachenko Ya.Yu. carried out theoretical and experimental studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.