

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-73-80>

УДК 626.823.54: 532.533



ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНОГО ОФОРМЛЕНИЯ НИЖНЕГО БЬЕФА МАЛОПРОЛЕТНОГО ВОДОПРОПУСКНОГО СООРУЖЕНИЯ

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 проспект, 64, Россия

Аннотация. На примере Курского гидроузла комплексного назначения в статье приведены предложения по обеспечению безаварийной и надежной работы водосбросных малопроемных сооружений, характерных для мелиоративных водоемов агропромышленного комплекса России. Рассмотрены результаты лабораторного проектирования устройств нижнего бьефа на выходном участке открытого трехпролетного водосброса. Цель исследований заключалась в отыскании технических решений оптимальных схем системы гашения энергии, предотвращающих либо уменьшающих сбойность течения ввиду несимметричных сбросов воды при реновации водопропускного сооружения. В результате исследований установлен вариант расположения растекателей, обеспечивающий благоприятное растекание потока при всех открытиях пролетов водосброса и безопасное сопряжение с нижним бьефом без образования сбоев потока по сравнению с проектной и существующей конструктивными схемами водобойного участка. За растекателями в зоне максимума дефицита давления для оптимизации параметров плит крепления рекомендовано устройство специальные дренажные колодцы.

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-29-00928, <https://rscf.ru/project/23-29-00928/>

Ключевые слова: малопроемный водосброс, крепление нижнего бьефа, система гасителей и растекателей потока, пульсация и дефицит давления

Формат цитирования: Черных О.Н., Бурлаченко А.В., Бурлаченко Я.Ю. Оптимизация конструктивного оформления нижнего бьефа малопроемного водопропускного сооружения // Природообустройство. 2025. № 1. С. 73-80. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-73-80>

Scientific article

OPTIMIZATION OF THE DESIGN OF THE DOWNSTREAM OF A LOW-SPAN CULVERT STRUCTURE

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

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskaya st., 49, Russia

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

Abstract. On the example of the Kursk hydraulic unit of a complex purpose, proposals are given to ensure the accident-free and reliable operation of spillway low-span structures typical for reclamation reservoirs of the agro-industrial complex of Russia. The results of laboratory design of downstream devices at the outlet section of an open three-span spillway are considered. The purpose of the research is to find technical solutions for optimal schemes of the energy damping system that prevent or reduce flow failure due to asymmetrical water discharges during the renovation of the culvert. As a result of the research, a variant of the spreading arrangement was established, which provides a favorable flow spreading at all openings of the spillway spans and safe connection with the downstream without the formation of a flow failure in comparison with the design and existing structural schemes of the culvert section. Behind the spreaders in the zone of maximum pressure deficit, it is recommended to arrange special drainage wells to optimize the parameters of the fastening plates.

The work was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 23-29-00928, <https://rscf.ru/project/23-29-00928/>

Keywords: low-span spillway, downstream support, flow damper and spreader system, pressure pulsation and deficit

Format of citation: Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Burlachenko Ya.Yu. Optimization of the design of the downstream of a low-span culvert structure // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1 P. 73-80. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-73-80>

Введение. Пропуск максимальных расходов воды через гидроузлы является одним из основных факторов, определяющих безопасность и надежность как водопропускных гидротехнических сооружений, так и напорного фронта гидроузлов. Устройства нижнего бьефа за водосбросом должны не только создавать благоприятные режимы сопряжения, но и быть достаточно устойчивыми и прочными при воздействии на них знакопеременных нагрузок от потока, льда, кавитации и наносов [1, 2]. Треть всех зарегистрированных аварийных ситуаций и инцидентов на гидроузлах комплексного назначения связана с различными нарушениями и отказами на водосбросных сооружениях [3]. К факторам риска, помимо стихийных, можно отнести и такие антропогенные ошибки, как недостаточность полноты гидравлических экспериментальных исследований или неучет их рекомендаций для сооружений высокого класса ответственности [4-6]. Например, при проектировании и расчетном обосновании малопролетных водосбросных сооружений ввиду невысокого их класса опасности и отсутствия приемлемых рекомендаций в основу конструирования и расчетов устройств нижнего бьефа ошибочно положены те же принципы, что и для многопролетных водосливных плотин. Анализ опыта эксплуатации таких сооружений показал, что они работают как при симметричном, так и при несимметричном режиме пропуска расходов. В нижних их бьефах весьма часто наблюдается движение потока со сбойным течением, приводящее в отводящем русле к размывам и деформациям береговых зон.

Цель исследований. Поиск технических решений оптимальных схем системы гашения энергии, предотвращающих или уменьшающих сбойность течения ввиду несимметричных сбросов воды при реновации водопропускного сооружения.

Материалы и методы исследований. С такой проблемой столкнулись гидростроители при реновации Курского гидроузла – самого значимого водного объекта в регионе. Строительство водохранилища на р. Тускарь с гидротехническими сооружениями было начато еще в 1977 г. По проекту предусматривалось его наполнение до отметки 165,5 м. Распад СССР, сложная экономическая ситуация в стране, ограниченность средств не позволили реализовать проект в полном объеме. С 1995 г. финансирование строительства было прекращено, стройка заморожена.

Для решения проблем водоснабжения Курского региона, сокращения дефицита технической и питьевой воды, увеличения в меженный период водности главной реки Сейм и ее правого притока р. Тускарь, протекающего через г. Курск, а также для сокращения затопления части заселенной территории Курска и Курского района весенними паводками правительством Курской области в 2005 г. было принято решение возобновить строительство водохранилища. В 2010 г. объект был передан из федеральной собственности в областную. В декабре 2013 г. пусковой комплекс «Курского моря» с возможностью наполнения до отметки 162,0 м, средней глубиной примерно 3,3 м, объемом воды 17,7 млн м³, площадью водной поверхности 950 га был введен в эксплуатацию. Весной 2015 г. водохранилище впервые было заполнено до отметки 162,0 м. При таком наполнении более половины акватории составили мелководья (с глубиной воды до 1,5...2,0 м), которые зарастают водной растительностью (рис. 1), а в теплое время года наблюдается интенсивное цветение сине-зеленых водорослей. Через 5 лет планировалось поднять уровень до отметки 165,5 м.

С 2014 г. этот гидроузел находится в оперативном надзоре ОКУ «Управление по эксплуатации гидротехнических сооружений Курской области», подведомственного департаменту экологической безопасности и природопользования. Земляная намывная плотина состоит из левобережной (высота 12 м, ширина гребня 10 м, заложение откосов $m_h = 3,0$, $m_t = 3,5$) и правобережной частей. Тело намыта из песков средней крупности, полученных при дноуглублении ложа водохранилища. Отметка гребня плотины – 168,9 м. Движение по гребню является несанкционированным. С плотины 10 лет назад незаконно были устроены съезды к верхнему и нижнему бьефу, а дренажные каналы, сделанные при строительстве в соответствии с проектом, замусорены, заросли или засыпаны населением. Наслонный дренаж закольматирован и разрушен. Это привело к сильному заболачиванию приплотинных участков.

Сейчас разрабатывается проектная документация для пуска второй очереди водохранилища с повышением уровня на 3,5 м (до отметки 166 м), роста площади акватории более чем в 4 раза (до 37 тыс. км²), запаса воды – с 21,1 до 100 млн м³. При этом предстоит расселить более 4,5 тыс. жителей 12 населенных пунктов

Курского и Золотухинского районов, подготовить зону затопления водохранилища, провести мероприятия по очистке и освоению прибрежной территории, создать инженерную защиту прилегающих объектов.

Водосброс с расчетным расходом $Q = 1020 \text{ м}^3/\text{с}$ был разработан в виде трехпролетной водосливной плотины с порогом практического профиля, сопрягающейся с левобережной и правобережной частями грунтовой плотины (рис. 2). Ширина пролетов в свету – $b = 12 \text{ м}$, удельный расход по плотине – $28,4 \text{ м}^2/\text{с}$. В нижнем бьефе водосброса был запроектирован бетонный водобойный колодец глубиной $1,3 \text{ м}$ и длиной $24,7 \text{ м}$, сопрягающийся с короткой рисбермой длиной $20,5 \text{ м}$. В конце рисбермы предусмотрен ковш, заполненный каменной наброской. Колодец и рисберма имеют расширение в плане под углом 7° к оси потока. В конце водобойного колодца по рекомендации первого этапа модельных исследований при строительстве была установлена прорезная стенка (рис. 2а) [1, 6]. В основании

водосброса залегают аллювиальные отложения, представленные разнородными песками.

Речь о модернизации всего гидроузла ведется уже в течение более 10 последних лет. От водосброса ранее был сделан отводящий канал длиной 1100 м , который идет вдоль автодороги Курск-Поныри и впадает в быстро мелеющую р. Тускар. За 30 лет эксплуатации он ни разу не был расчищен, зарос кустарниками и деревьями, обмелел и был занесен илом. На сегодня канал находится в стадии незавершенного строительства и очистки. Планируется за 338 млн руб. восстановить его пропускную способность к концу 2025 г. Ремонт канала позволит также повысить безопасность эксплуатации грунтовой плотины и восстановить нормальный режим работы открытой дренажной системы. В ноябре 2021 г. были завершены работы по техническому обслуживанию и текущему ремонту затворов водосброса. В настоящее время частично устаревший проект реконструкции сооружений гидроузла для завершения второй очереди ввода Курского водохранилища к 2027 г.



Рис. 1. Типичное состояние прибрежных зон Курского водохранилища на р. Тускар, июнь 2024 г.

(фото пресс-службы правительства Курской области)

Fig. 1. Typical state of the coastal zones of the Kursk reservoir on the Tuskar River, June 2024 (photo: press service of the government of the Kursk region)



а



б

Рис. 2. Вид выходного (а) и входного (б) участков водосбросной трехпролетной плотины Курского гидроузла, июнь 2024 г.

Fig. 2. View of the outlet (a) and inlet (b) sections of the three-span spillway dam of the Kursk hydraulic unit, June 2024

реанимируется. В соответствии с планами Росводресурсов в рамках нацпроекта «Экологическое благополучие», стартовавшего 1 января 2025 г., планируется выделить на это 9,5 млрд руб. (сюда входят также углубление водохранилища, очистка берегов и расчистка р. Тускарь).

Гидравлические исследования водосбросного сооружения проводились на пространственной модели, выполненной в масштабе 1:45, который был выбран из условий соблюдения основных закономерностей подобия при преобладающем действии сил тяжести и обеспечения автомодельности по числу Рейнольдса, изменяющемуся в опытах от 20000 до 100000. При всех режимах пропуска расходов через водосброс фиксировалось сопряжение бьефов в плане. Уровни воды, глубины и отметки определялись шпигтенмасштабами [7]. При исследованиях в зоне нижнего бьефа измерялись осредненные и пульсационные характеристики потока: скорости – микровертушками Х-6 и тензометрическими датчиками; давление – пьезометрами и датчиками давления индуктивного типа ДДМ-6 [8, 9]. Определялась пропускная способность сооружения треугольным мерным водосливом, и регистрировались гидродинамические нагрузки на плиты крепления площадочной плитой-датчиком консольного типа. Исследования выполнялись в широком диапазоне изменения возможных

схем маневрирования затворами во всех трех пролетах водосброса.

Было установлено, что при пропуске расчетного расхода через три пролета водобойный колодец не обеспечивает приемлемые условия сопряжения бьефов и равномерного растекания потока на рисберме. Наблюдается концентрация потока на оси водосброса непосредственно за коловцем: ковш не оказывает существенного влияния на его растекание (рис. 3). Скорости течения были распределены неравномерно: так, на расстоянии 90 м от конца колодца средние скорости у левого берега в 3 раза меньше, чем у правого. Придонные скорости в створе за ковшом в 4 раза превышали допустимые на размыв.

Неравномерное распределение скоростей наблюдалось при всех вариантах маневрирования затворами на рисберме и в отводящем канале. Уже на первом этапе исследований было ясно, что для улучшения гидравлических условий работы нижнего бьефа необходимо или снабдить водобой растекателями [10], пашечными гасителями [5], дополнительной водобойной стенкой, или удлинить бычки на всю длину водобоя. Примерами таких конструкций являются водосбросы Итаицу (Бразилия), Каруюна (Иран), Тарбела (Пакистан), Шамхирский гидроузел (Азербайджан), Подольский и Крапивинский гидроузлы (Россия) [5, 11, 12]. При строительстве

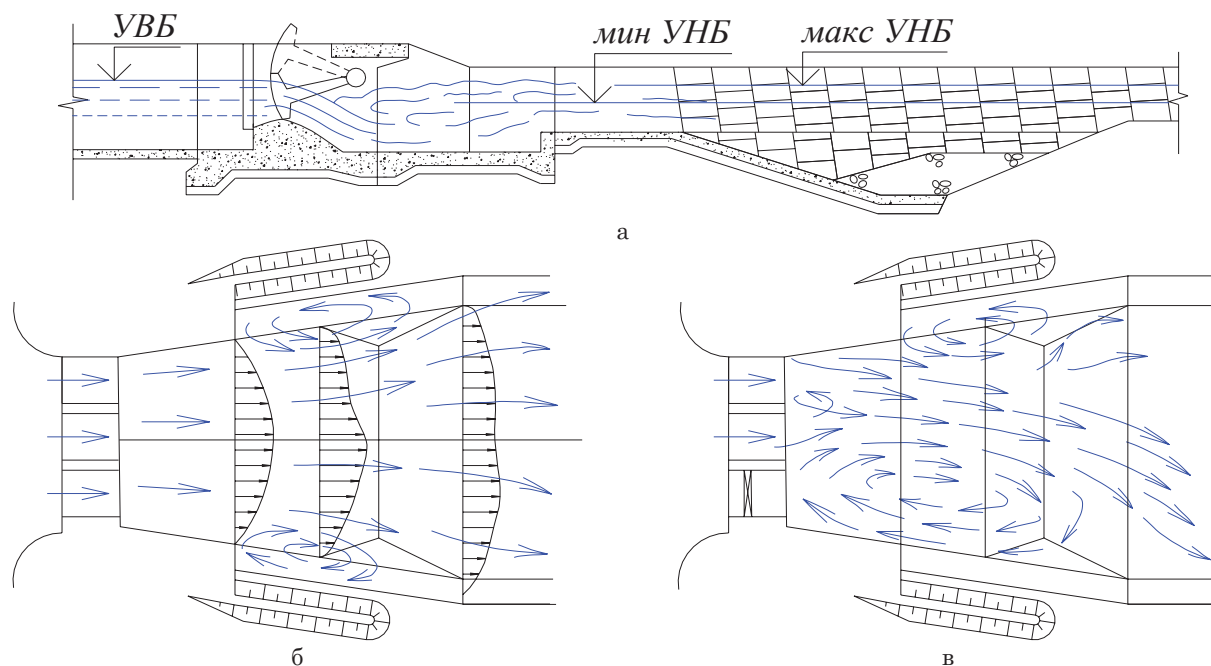


Рис. 3. Результаты исследования проектного варианта водосброса Курского гидроузла: а – разрез по оси водосброса; б – схема течения в нижнем бьефе при всех открытых пролетах, $Q = 1020 \text{ м}^3/\text{с}$; в – то же при работе двух открытых затворов, $Q = 680 \text{ м}^3/\text{с}$

Fig. 3. Results of the study of the design variant of the Kursk hydraulic unit spillway:

a – section along the axis of the spillway; b – downstream flow scheme for all open spans, $Q = 1020 \text{ m}^3/\text{s}$; c – the same with the operation of two open gates, $Q = 680 \text{ m}^3/\text{s}$

Курского гидроузла рекомендации были учтены лишь частично: был установлен только второй ряд гасителей в конце водобоя (рис. 2а).

Результаты и их обсуждение. Одна из основных причин неудовлетворительной работы проектного варианта заключается в том, что вместо ожидавшегося сопряжения несовершенным гидравлическим прыжком на выходном участке водосброса происходит сопряжение несовершенным прыжком типа прыжка-волны. Такой прыжок обычно возникает при небольших числах Фруда (менее 9) [1], отличается высоким гребнем первой волны и медленно затухающей по длине потока цепью малых волн. При этом за обратными стенками в конце водобоя возникают водоворотные зоны, имеющие непосредственное сообщение с зоной гидравлического прыжка на водобое. Эти водовороты способствуют сжатию транзитного потока в плане и боковому натеканию на него нетранзитных масс жидкости. Особенно отчетливо сбойное течение проявлялось при работе водосброса по схеме несимметричного сброса одним или двумя пролетами (рис. 3с). Анализ гидравлических условий работы нижнего бьефа водосброса при всех расходах и схемах маневрирования показал, что водобойный колодец, как и рисберма, не обеспечивает требуемые условия сопряжения бьефов и нуждается в существенной конструктивной доработке. Было отмечено, что боковые крепления дамбы заметно не влияют на сопряжение бьефов, и растекание потока при пропуске расходов меньше расчетного. Они вступают в работу лишь при пропуске расходов обеспеченностью 0,1% и ниже. Основные недостатки проектного варианта для исследуемого водосброса были вызваны прежде всего тем, что при разработке его конструкции проектировщики использовали элементы нижнего бьефа, хорошо зарекомендовавшие себя в практике проектирования и эксплуатации многопролетных водосливных плотин.

Для ликвидации в пределах крепления прыжка-волны был рассмотрен ряд вариантов устройства в конце водобойного колодца стенки с наклонной зубчатой или сплошной лобовой гранью. Эти исследования позволили установить, что наиболее эффективно работает стенка с зубчатой наклонной лобовой гранью (рис. 4). В дополнение к стенке подбирали системы гасителей и растекателей потоков, аналогичные использованным в конструкции водосброса Подольского и Шамхирского гидроузлов [1]. Кроме того, изучали следующие системы гасителей: комбинацию гасителей В.И. Кузьменкова; растекатели

с различными углами поворота, шашечные гасители и водобойную стенку (сплошную и зубчатую); растекатели, водобойный порог и стенку; растекатели, узкие водобойные порожки и стенку; растекатели, прорезную стенку и криволинейную в плане стенку за колодцем; и др. [2, 4-7].

Установлено, что угол поворота растекателей и расстояние между ними значительно влияют на условия растекания потока. Наиболее рациональной оказалась схема расположения растекателей, изображенная на рисунке 4. Установлено, что лучшие результаты показывают варианты с заложением верховой грани стенки около 2, высотой до $0,3h_z$, h_z – глубина в нижнем бьефе, располагающейся на выходе из колодца, при котором отсутствует явление разделения потока на две струи со значительными скоростями вдоль откосов отводящего участка. Полученные результаты полностью согласуются с данными Бюро мелиорации США [5, 13]. Однако приходится признать, что предлагаемые конструкции являются немного громоздкими для практического применения. Удлинение раструбной части колодца за водобойную стенку и некоторое увеличение центрального угла расширения подпорных стенок (хотя бы до 10°) улучшают условия растекания потока за креплением.

При открытии всех пролетов или одного среднего увеличиваются скорости течения в зоне левостороннего откоса отводящего канала, и возникает сбойное течение. В случае пропуска расчетного расхода водосброса наблюдались стоячие волны за стенкой на осевой части потока. Высота волн, распространяющихся до середины ковша, достигала 1 м, а длина – 10...15 м.

Возникновение волн усложнило условия работы плит рисбермы. Для ликвидации этого явления была уменьшена высота стенки в средней части колодца, где рекомендовано выполнить ее непрорезной. Анализ эпюр скоростей показал, что окончательная схема расположения растекателей (рис. 4) обеспечивает хорошее растекание потока при всех открытиях. Даже при увеличении коэффициента несимметрии входа струи на водобой до 0,459...0,591, то есть при открытии двух левых смежных или одного левого пролетов, в отводящем канале растекание потока было вполне благоприятным (рис. 5а, б).

Из графика изменения относительных скоростей на оси водосброса V_{max}/V , где V_{max} – максимальная придонная скорость, V – средняя скорость на оси (рис. 6), следует, что предлагаемый вариант конструкции водосброса практически при всех схемах маневрирования работает лучше, чем проектный.

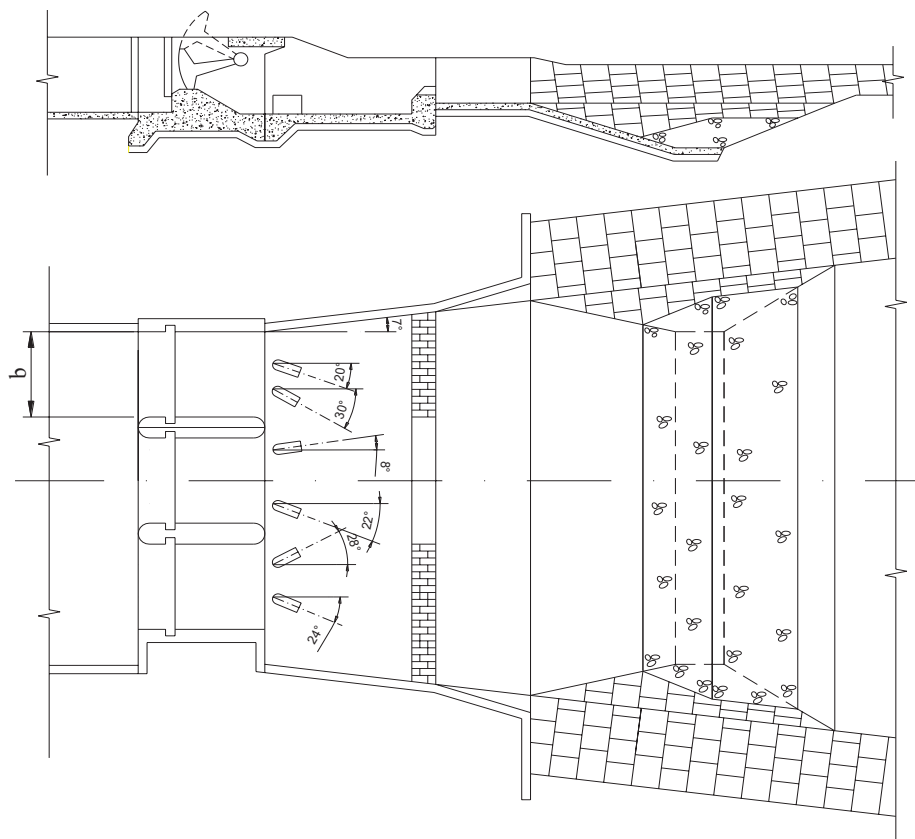


Рис. 4. Продольный разрез и план конструктивного оформления устройств нижнего бьефа Курского гидроузла, разработанного на основании результатов модельных гидравлических исследований

Fig. 4. Longitudinal section and plan of structural design of downstream devices of the Kursk hydraulic unit, developed on the basis of the results of model hydraulic studies

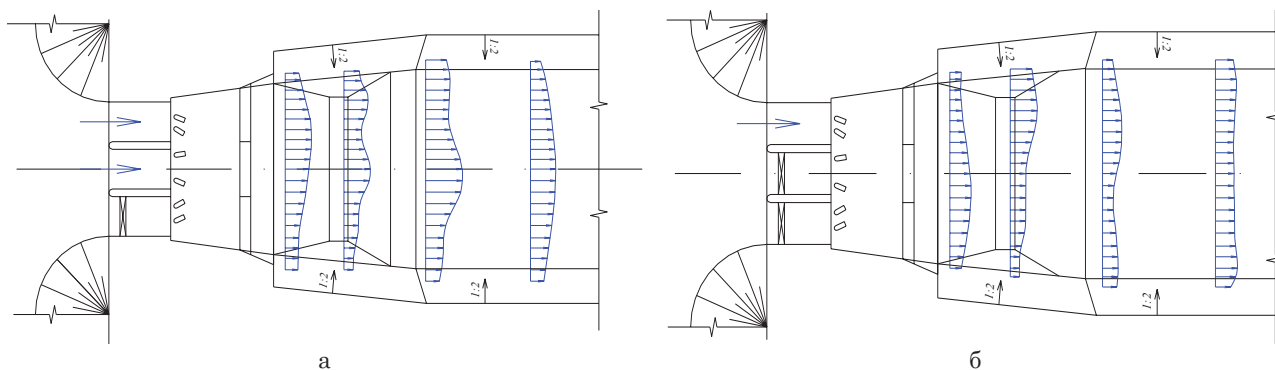


Рис. 5. Схемы плановых эпюр скоростей потока в отводящем канале при работе двух (а) и одного (б) пролетов водосброса с предлагаемой схемой гасящих устройств на водобое Курского гидроузла

Fig. 5. Schemes of planned diagrams of flow velocities in the diversion channel during the operation of two (a) and one (b) spans of the spillway with the proposed scheme of damping devices at the baffle of the Kursk hydraulic unit

Анализ результатов измерения гидродинамических нагрузок на плиты крепления позволил установить, что для повышения устойчивости плит водобоя и рисбермы и обеспечения под ними минимального фильтрационного давления необходимо сделать за растекателями дренажные колодцы в зоне максимума дефицита давления [9]. Для исключения

проникновения пульсаций давления через эти колодцы под плиты водобоя рекомендуется выполнять колодцы из пористого экобетона [4]. В существующем реконструируемом водосбросе растекатели и дренажные колодцы в настоящее время отсутствуют. Это в значительной мере и ограничивает дальнейшую эксплуатацию всего водосброса.

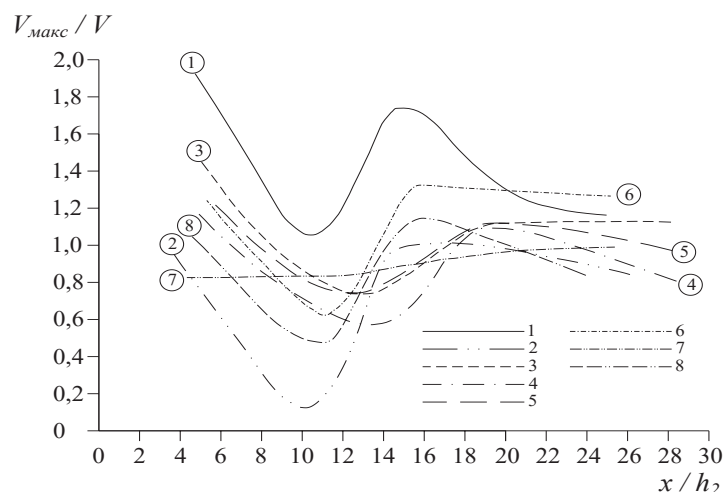


Рис. 6. Графики изменения относительных максимальных придонных скоростей V_{max}/V по оси водосброса при разных режимах его работы:

- 1, 2 – открыты все пролеты; 3 – открыт первый пролет; 4 – открыт второй пролет;
5 – открыт третий пролет; 6 – открыты два крайних пролета;
7 – открыты первый и второй пролеты; 8 – открыты второй и третий пролеты

Fig. 6. Graphs of changes in the relative maximum bottom velocities V_{max}/V along the axis of the spillway at different modes of its operation:

- 1 and 2 – all spans are open; 3 – the first span is open; 4 – the second span is open; 5 – the third span is open;
6 – two outermost spans are open; 7 – the first and second spans are open; 8 – the second and third spans are open

Таким образом, при проектировании креплений за малопролетными сооружениями следует учитывать, что отдельные конструктивные элементы крепления, хорошо зарекомендовавшие себя при работе многопролетных сооружений (например, расширяющиеся водобойные колодцы с простейшими типами гасящих устройств, ковши за рисбермой), в конкретном случае могут оказаться малоэффективными, а при сравнительно больших удельных расходах вообще неприемлемыми, особенно в тех случаях, когда при ремонте могут быть засыпаны полностью каменной наброской [14]. Для дальнейшего совершенствования конструкций устройств крепления открытых малопролетных сооружений, а также для разработки новых методов расчетного обоснования параметров гасящих устройств необходимо продолжить лабораторные и натурные исследования гидравлических и динамических условий работы их нижних бьефов.

Выводы

Восстановление Курского водохранилища будет способствовать повышению качества жизни населения, обеспечит г. Курск необходимым запасом воды и позволит защитить прилегающие

территории от затопления и подтопления в период половодья или чрезвычайной ситуации.

На основании лабораторных исследований установлено, что проектный вариант устройства выходного участка нижнего бьефа и существующая конструктивная схема гашения энергии за водосбросом Курского гидроузла не позволяют исключить сбойность потока в отводящем канале даже при работе водосбросного сооружения полным фронтом.

Экспериментально подобран и апробирован вариант установки дополнительных растекателей потока на водобое. Предложенный вариант оптимизации устройств нижнего бьефа поможет решить проблему повышения надежности работы водосброса и гидроузла при его реновации, связанной с необходимостью поднятия отметки уровня воды в водохранилище до проектной после нескольких десятилетий временной эксплуатации. Это позволит обеспечить снижение суммарной гидродинамической нагрузки на плиты крепления, равномерное распределение скоростей в конце укрепленного участка за водосбросом и минимизировать риск значительного перестроения отводящего русла водотока.

Список использованных источников

1. Розанов Н.П. Устройства нижнего бьефа водосбросов: Монография / Н.П. Розанов, Н.Т. Кавешников, В.И. Китов. Под ред. проф. Н.П. Розанова. М.: Колос, 1984. 269 с.
2. Obidov B., Vokhidov O., Shodiev B., Ashirov B., Saraeva M. (2020). Hydrodynamic loads on a water drain with

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. Obidov B., Vokhidov O., Shodiev B., Ashirov B., Saraeva M. (2020) Hydrodynamic loads on a water drain with

cavitation quenchers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 883. Pp. 012011.

3. Черных О.Н. Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений мелиоративного гидроузла с грунтовой плотинной: Методические указания. / О.Н. Черных, А.В. Бурлаченко. М.: РГАУ-МСХА, 2022. 172 с.

4. Burlachenko A.V., Burlachenko Y.Y., Brakeni A., Chernykh O.N. Ensure the stability of the water retention plates of hydraulic structure // Larhyss Journal. 2004. № 58. Pp. 73-87.

5. Волков В.И. Открытые береговые водосбросы: учебник / В.И. Волков, О.Н. Черных, А.Г. Журавлёва, И.С. Румянцев, В.И. Алтушин. М.: МГУП, 2012. 244 с.

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

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

8. 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.

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

10. 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>.

11. Черных О.Н. Обеспечение надежности крепления из плит за водопропускными сооружениями мелиоративных систем АПК // О.Н. Черных, А.В. Бурлаченко, Я.Ю. Бурлаченко // Природообустройство. 2023. № 5. С. 41-46.

12. Справочник по гидравлическим расчетам / П.Г. Киселёв, А.Д. Алтшуль, Н.В. Данильченко и др. М.: ЭКОЛИТ, 2011. 312 с.

13. Чоу В.Т. Гидравлика открытых каналов: Монография. М.: Стройиздат, 1969. 464 с.

14. Алсадек Е.С. Крепления в нижнем бьефе шахтного водосброса гидроузла «16 Тишрин» // Природообустройство. 2024. № 3. С. 63-70.

cavitation quenchers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 883. P. 012011.

3. Chernykh O.N., Burlachenko A.V. Ensuring the safety of hydraulic structures of a melioration hydroelectric complex with an earth dam: Tutorial. M.: RGAU-MSHA, 2022. 172 p.

4. 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.

5. Volkov V.I. et al. Open coastal spillways: Textbook / V.I. Volkov, O.N. Chernykh, A.G. Zhuravleva, I.S. Rumyantsev, V.I. Altunin. M.: MGUP, 2012. 244 p.

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

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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>.

11. 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.

12. Handbook of hydraulic calculations / P.G. Kiselev, A.D. Altshul, N.V. Danilchenko et al. Moscow: EKOLIT, 2011. 312 p.

13. Chou V.T. Hydraulics of open channels: monograph. M.: Stroyizdat, 1969. 464 p.

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.

Об авторах

Ольга Николаевна Черных, канд. техн. наук, доцент; WoS ResearcherID: 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; WoS ResearcherID: 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: WoS ResearcherID: 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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 10.12.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 19.01.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 19.01.2025

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.