

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-5-80-87>

УДК 532.54:626.8



## ОЦЕНКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ПЛИТЫ КРЕПЛЕНИЯ ВОДОБОЯ МЕЛИОРАТИВНЫХ ГИДРОУЗЛОВ

О.Н. Черных<sup>1✉</sup>, А.В. Бурлаченко<sup>2</sup>, Я.Ю. Бурлаченко<sup>1</sup><sup>1</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after С.А. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskayast., 49, Russia<sup>2</sup>Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 125319, Moscow, Leningradsky prospect, 64, Russia

**Аннотация.** Приводятся результаты экспериментальных исследований распределения осредненных и пульсационных нагрузок на плиты крепления расширяющегося водобоя и рисбермы, замеренные с помощью точечных датчиков и датчиков суммарной нагрузки при наличии на дне трех рядов гасителей энергии потока за малопролетным трубчатый водосбросом. Изложены соображения об использовании полученных данных для уточнения гидравлических и гидротехнических расчетов трехочковых водопропускных сооружений при их проектировании, ремонте и реновации. Изучено изменение перепадов осредненного давления, стандартов пульсации давления, суммарной гидродинамической нагрузки и амплитудно-частотных характеристик потока на элементах крепления нижнего бьефа Шамкирского гидроузла мелиоративного назначения, реконструируемого на реке Кура в Азербайджане. Установлено, что для обеспечения надежности водосбросных сооружений определение суммарных нагрузок и построение квазистатического нагружения крепления нижнего бьефа, выбор его рациональной конструкции и оптимизацию режимов эксплуатации можно проводить, вкупе используя известные рекомендации и объективно разработанную научную методологию, внося коррективы по результатам модельных исследований.

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

**Ключевые слова:** малоочковый водосброс, плиты крепления, водобой, пульсация давления, гидродинамические нагрузки, устойчивость

**Формат цитирования:** Черных О.Н., Бурлаченко А.В., Бурлаченко Я.Ю. Оценка гидродинамических нагрузок на плиты крепления водобоя мелиоративных гидроузлов // Природообустройство. 2024. № 5. С. 80-87. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-5-80-87>

Scientific article

## ASSESSMENT OF HYDRODYNAMIC LOADS ON THE SLABS OF THE CULVERT FASTENING OF RECLAMATION WATERWORKS

O.N. Chernykh<sup>1✉</sup>, A.V. Burlachenko<sup>2</sup>, Ya.Yu. Burlachenko<sup>1</sup><sup>1</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after С.А. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskayast., 49, Russia<sup>2</sup>Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 125319, Moscow, Leningradsky prospect, 64, Russia

**Abstract.** The results of experimental studies of the distribution of averaged and pulsating loads on the fastening slabs of an expanding culvert and apron, measured using point sensors and total load sensors in the presence of three rows of flow energy absorbers at the bottom behind a short-span tubular spillway, are presented. Considerations are presented on the use of the obtained data to clarify the hydraulic and hydraulic engineering calculations of three-point culvert structures during their design, repair and renovation. The change in average pressure differences, pressure pulsation standards, total hydrodynamic load and amplitude-frequency characteristics of the flow on the fastening downstream elements of the Shamkir hydroelectric complex for reclamation purposes, reconstructed on the Kura River in Azerbaijan, has been studied. It has been established that to ensure the reliability of spillway structures, the determination of total loads and the construction of a quasi-static loading of the downstream fastening, the choice of its rational design and the optimization of operating modes can be carried out, together with the use of known recommendations and objectively developed scientific methodology, making adjustments based on the results of model studies.

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

**Keywords:** low-point spillway, fastening slabs, culvert, pressure pulsation, hydrodynamic loads, stability

**Format of citation:** Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Burlachenko Ya.Yu. Assessment of hydrodynamic loads on the slabs of the culvert fastening of reclamation waterworks // Prirodoobustrojstvo. 2024. No. 5. P. 80-87. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-5-80-87>

**Введение.** Разрушения на мелиоративных гидроузлах по причине отказа водосбросного сооружения составляют более 30% [1, 2]. Своевременный ремонт и реконструкция гидротехнических сооружений (ГТС) существенно снижают риск аварии на гидроузле и ее последствий [3]. При этом необходимо принимать к сведению то, что многие вопросы гидравлики и гидродинамики нижнего бьефа водосбросных ГТС были исследованы или учтены при проектировании недостаточно полно [4]. Это и явилось одной из причин того, что некоторые водосбросные сооружения сразу после пуска работали неудовлетворительно и, не достигая положенного срока эксплуатации, выходили из строя или требовали значительного ремонта [5]. В настоящее время основная деятельность гидротехников сосредоточена на усовершенствовании уже существующих гидроузлов: реконструкции, модернизации и оптимизации функционирования элементов всех ГТС. Работа направлена, в том числе, на то, чтобы иметь корректно запроектированные и качественно выполненные устройства нижнего бьефа (элементов водобоя, рисбермы, концевых устройства и пр.), обеспечивающие благоприятный режим сопряжения бьефов, не подвергающихся недопустимым разрушениям при волновом динамическом воздействии, не допускающих сбойных течений и опасных размывов в отводящем канале [1, 6].

Шамкирский гидроузел комплексного назначения (1975-1982 гг.) расположен на р. Куре в Азербайджане и входит в каскад Курейских ГЭС. Это вторая по величине ГЭС на северо-западе Азербайджана со среднегодовой выработкой электроэнергии 810 млн квт·ч. Водохранилище обеспечивает поливной водой 46000 га земель. В состав гидроузла входят: грунтовые плотины; строительно-эксплуатационный водосброс; здание ГЭС с водоприемником и двумя турбинами мощностью 380 мвт при расчетном напоре 58 м; ирригационный водозабор (рис. 1). Руслловая земляная плотина с наклонным ядром из суглинки имеет длину по гребню 1800 м и наибольшую высоту 70 м. Пойменная плотина с суглинистым экраном имеет высоту 40 м и длину по гребню 1700 м. Водосброс, расположенный

в теле руслловой плотины, включает в себя: входной оголовок с тремя пролетами; донные трубы-галереи длиной по 160 м; выходной оголовок с гасителями; отводящий канал. Транзитный тракт водосброса разделяется двумя быками толщиной 1,5 м на три галереи шириной 8,3 м каждая.

**Материалы и методы исследований.** Начиная с 2003 г. Шамкирский гидроузел находился в аварийном состоянии. Ввиду коррозии бетона, появления больших трещин, разрушения защитного слоя бетона трехочкового подземного водовода, обнажения арматуры, разрушения бетонного крепления водобойного участка и размывов за рисбермой, сильной утечки воды через бетон и контактные сечения в определенный момент могла возникнуть чрезвычайная ситуация на гидроузле. В аварийном состоянии находились и грунтовые подпорные сооружения. В связи с этим с 2021 г. были начаты работы по ремонту и реновации основных ГТС Шамкирского гидроузла (рис. 2). Одновременно планировалось провести и ремонтно-восстановительные работы на гидроагрегатах Шамкирской ГЭС.

Модельная установка для оценки гидродинамических нагрузок на элементы крепления нижнего бьефа гидроузла была выполнена из камня и дерева в линейном масштабе 1:50 применительно к условиям трехпролетного водосброса с параметрами: максимальный расход  $Q = 2980 \text{ м}^3/\text{с}$ ; напор относительно выходного сечения трубы  $H = 4,92d_1$ , где  $d_1 = 12 \text{ м}$  – высота прямоугольной галереи; перепад  $p = 1,33d_1$ ; относительная удельная энергия потока, выходящего из труб  $(\mathcal{E}_1 + p)/h_1 = 7,2...9,6$ ;  $\mathcal{E}_1 = h_1 + v_1^2/2g$ ;  $h_1$  и  $v_1$  – глубина и скорость на выходе из галереи;  $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ ; глубина в отводящем канале  $h_2 = (0,63...1,08) d_1$ ; подтопление выходного сечения  $n = (h_1 - p)/h_2 = 1,9...2,7$  [1, 7]. Моделирование осуществлялось по критерию гравитационного подобия. При этом на модели обеспечивались числа Рейнольдса, находящиеся в автомодельной зоне ( $Re = 20000...75000$ ). Система гашения состояла из трех рядов зубчатых порогов на расширяющемся водобойном колодце с углом  $\alpha = 24^\circ$  (рис. 3). За последним рядом гасителей ось сооружения

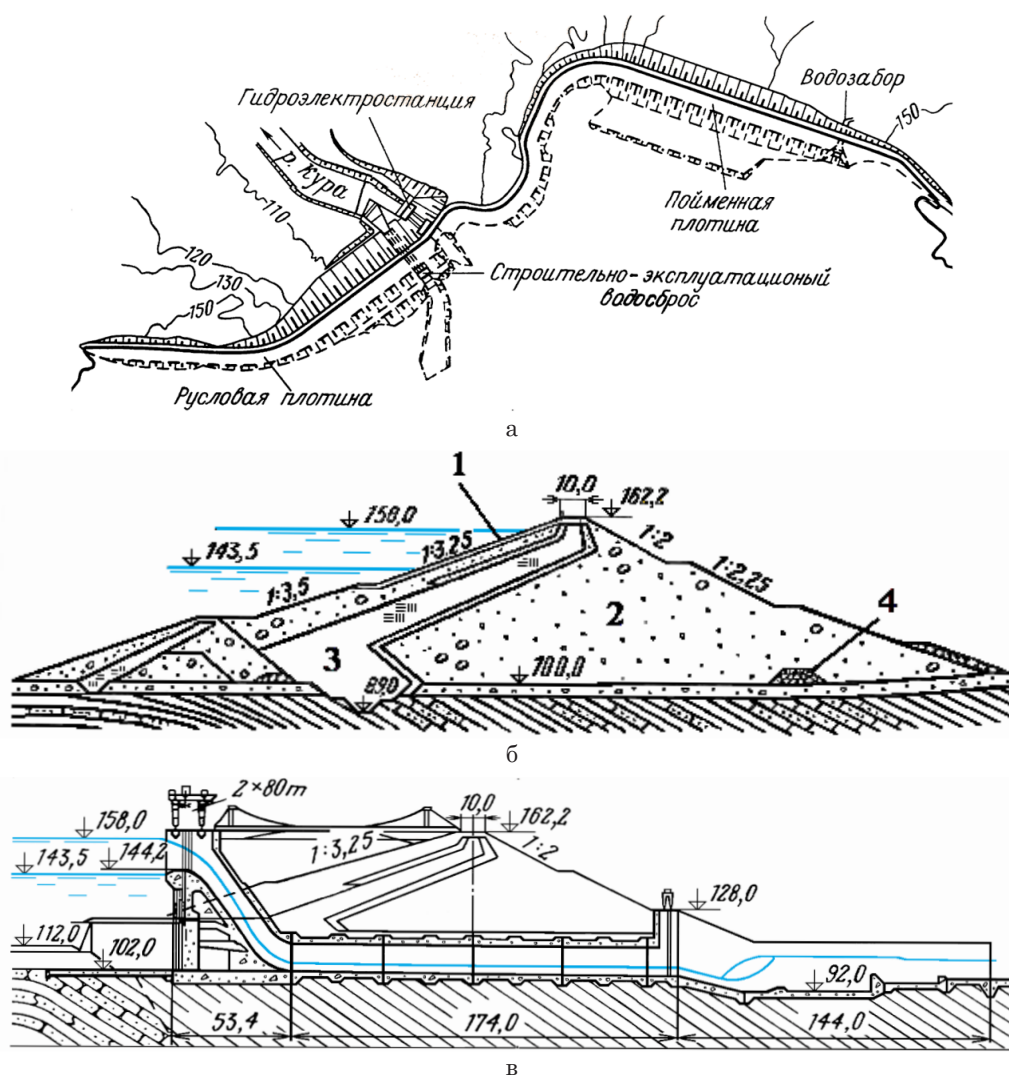


Рис. 1. Основные сооружения Шамкирского гидроузла:

а – план; б – русловая и пойменная земляные плотины; 1 – железобетонное крепление плитами; 2 – тело из гравийно-галечного грунта; 3 – наклонное ядро из суглинка; 4 – дренажная призма; в – эксплуатационный водосброс

Fig. 1. Main structures of the Shamkir hydroelectric complex:

а – plan; б – channel and floodplain earthen dams; 1 – reinforced concrete fastening with slabs; 2 – body made of gravel and pebble soil; 3 – inclined loam core; 4 – drainage prism; c – operational spillway



Рис. 2. Вид со стороны нижнего бьефа на начальные этапы работ по реновации водобойного участка водосброса, 2021 г. (фото Azerenerji OSC)

Fig. 2. View from the downstream side of the initial stages of work on the renovation of the culvert spillway section, 2021 (photo by Azerenerji OSC)



поворачивала на  $32^{\circ}47'$ . Особенности участка сопряжения: высокое число Фруда в сжатом сечении (до 15...60); расширяющийся в плане водобойный колодец; гасители специального типа; поворот отводящего канала; возможность возникновения пространственного прыжка и др. – затруднили использование аналогов для расчета квазистатической устойчивости элементов крепления.

Программа гидродинамических исследований предусматривала проведение экспериментов по определению нагрузок на плиты водобоя и рисбермы, оценку их устойчивости, оптимизацию толщины и конструкции плит крепления. Во время экспериментов статическая составляющая давления на элементы крепления определялась пьезометрированием, осредненные скорости – микровертушкой и трубкой Пито. Пульсационная составляющая давления измерялась 20 точечными индуктивными датчиками давления с приемной мембраной диаметром 6 мм и частотой собственных колебаний 2 кГц. Суммарное гидродинамическое давление, в том числе на фрагменты зубчатых гасителей, регистрировалось с помощью площадочной плиты-датчика консольного типа, позволяющей фиксировать продольную и вертикальную нагрузку, имеющей частоту собственных колебаний в воде 40...60 Гц [1].

Для динамических исследований были выбраны 3 режима работы сооружения: 1 – пропуск максимального расчетного расхода –  $Q = 2980 \text{ м}^3/\text{с}$  тремя полностью открытыми пролетами,  $(\mathcal{E}_1 + p)/h_1 = 9,6$ ,  $n = 2,7$ ; 2 – при открытом только крайнем левом пролете и  $Q = 790 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $(\mathcal{E}_1 + p)/h_1 = 7,2$  и  $n = 2,9$ ; 3 – пропуск расхода  $Q = 790 \text{ м}^3/\text{с}$  только через один средний,

полностью открытый пролет,  $(\mathcal{E}_1 + p)/h_1 = 7,2$ ,  $n = 2,9$ . Осредненное давление на плиты крепления сверху для каждого гидравлического режима определялось высотой пьезометрической линии над отметкой дна водобоя и рисбермы.

**Результаты и их обсуждение.** Для выбора оптимальной конструкции и толщины железобетонного крепления (в том числе с учетом нагрузки в его подплитной полости, наличия и месторасположения дренажных колодцев) по современным методологиям [8-10] внешнее воздействие потока на плиту  $\tilde{P}(t)$  задается осредненной нагрузкой на плиту сверху  $\langle \tilde{P}(t) \rangle = P$ :

$$\tilde{P}(t) = \langle \tilde{P}(t) \rangle = P(t), \quad (1)$$

где в стационарном режиме представляют пульсационное давление  $P(t)$  в виде функции спектральной плотности  $S_p(\omega)$ , определяемой экспериментальным либо теоретическим путем [9].

В результате экспериментов был выявлен ряд закономерностей в распределении осредненного  $\bar{P}_i$  и пульсационного составляющих давления  $P(t) = P_i$  в отдельных точках по площади крепления водобоя и рисбермы. Так, осредненное давление вдоль крепления выходного раструбного оголовка изменяется наиболее резко, когда работают при пропуске максимального расхода все три отверстия водосброса Шамкирского гидроузла (режим 1). Первый гаситель, состоящий из прилива трамплина и трех зубьев, способствует изгибу струи и повышению давления на участке до лицевой грани зуба  $P_i = 4\gamma h_1$ . За зубьями давление падает, при этом наибольший дефицит давления, отнесенный к скоростному напору на выходе из галереи  $\beta = |(\gamma h_2 - \bar{P}_i) / (v_1^2 / 2g)| = |\Delta P_{\text{ср}} / \gamma v_1^2 / 2g|$ ,

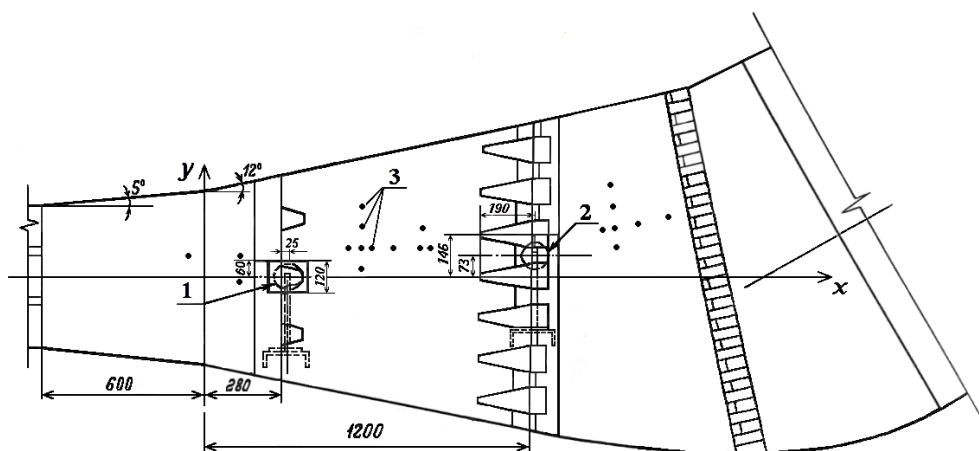
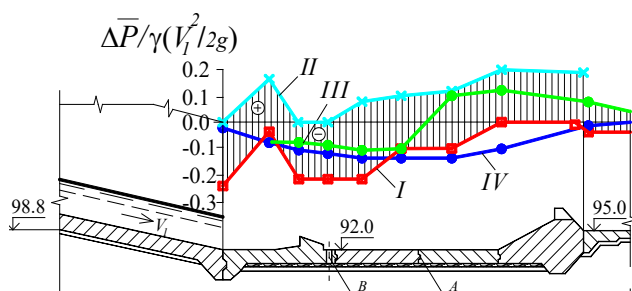


Рис. 3. Схема установки гасителей-датчиков (1, 2) и точечных датчиков (3) на плане выходного участка модели водосброса Шамкирского гидроузла

Fig. 3. Installation diagram of damper-sensors (1, 2) and point sensors (3) on the plan of the outlet section of the Shamkir hydroelectric complex spillway model

составляет 0,23. На водобое области понижения давления распространяются на первую треть плиты второго ряда, а затем давление повышается и практически соответствует гидростатическому (рис. 4). При работе сооружения в режиме 3 давление перераспределяется по поверхности водобоя, и максимум его понижения ( $\beta = 0,15$ ) наблюдается по оси сбойного течения в зоне сваля струй. При работе сооружения двумя галереями (режим 2) более нагруженными по сравнению с работой сооружения тремя галереями оказываются плиты рисбермы и откосов (в зоне закрытых отверстий  $\beta$  увеличивается в 4 раза). За гасителями здесь появляются пригружающие перепады давления. При этом на всем участке нижнего бьефа происходит лишь перераспределение осредненного давления по площади крепления.

В результате экспериментов выявлены области с наибольшей интенсивностью пульсации давления, характеризующейся значениями

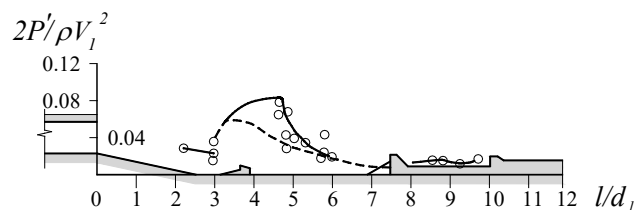


**Рис. 4. Схема квазистатического нагружения плит крепления водобойного участка водосброса Шамкирского гидроузла:**  
 а – продольный разрез по оси водобойного колодца;  
 I, II – эпюра перепадов осредненного давления на водобое при работе всех трех галерей при отсутствии или наличии дренажных колодцев (режим 1);  
 III – работает только одна крайняя левая галерея (режим 3);  
 IV – работает одна средняя галерея (режим 2);  
 А – окраска гидроизоляционным составом штрабного шва;  
 В – рекомендуемое место расположения дренажных колодцев

**Fig. 4. Scheme of quasi-static loading of slabs for fastening the culvert spillway section of the Shamkir hydroelectric complex:**  
 a – longitudinal section along the culvert axis;  
 I, II – diagram of average pressure differences at the culvert during operation of all three galleries in the absence or presence of drainage wells (mode 1);  
 III – only one extreme left gallery works (mode 3);  
 IV – one middle gallery is open (mode 2);  
 A – painting the fine seam with a waterproofing compound;  
 B – recommended location for drainage wells

стандарта пульсации  $P$  [10]. Установлено, что на расширяющемся водобое водосброса, работающего всеми галереями, интенсивность пульсации наиболее велика за каждым из источников возмущений – соответствующим рядом гасителей. Это объясняется наличием областей отрыва за ними со значительной пульсацией скоростей и нестабильностью высокочастотной компоненты давления. Относительно высокая интенсивность пульсации ( $P'/\gamma v_1^2/2g = 2P'/\rho v_1^2 = 0,085$ , где  $\rho = \gamma/g$  – плотность воды) за гасителем первого ряда в этом режиме работы связана главным образом с эффектами пространственного обтекания зубьев (рис. 5), причем распределение интенсивности пульсации давления лишь на участке до первого гасителя близко соответствует распределению интенсивности под плоским прыжком [11-14]. За вторым рядом гасителей интенсивность пульсации мала и составляет  $0,018\gamma v_1^2/2g$ . При работе водосброса одним средним пролетом (режим 3) на плитах первого ряда наблюдается некоторое увеличение пульсации давления. За первым зубчатый порогом стандарт пульсации поперек потока возрастает от  $0,01\gamma v_1^2/2g$  на расстоянии от выходного сечения галереи  $l = 0,12d_1$  до  $0,114v_1^2/2g$  при  $l = 1,12d_1$ . В целом при работе сооружения неполным фронтом значения стандарта пульсации давления на плитах второго и третьего рядов меньше, чем при работе сооружения всеми отверстиями.

Своеобразие схемы гашения и плавное расширение потока приводят к тому, что на водобойном участке даже при работе всех труб наблюдается пространственный режим. Осредненные и пульсационные скорости неравномерно распределены по ширине и глубине потока. При отсутствии поверхностного вальца в некоторых режимах градиенты скорости по глубине



**Рис. 5. Изменение относительного стандарта пульсации давления  $2P'/\rho v_1^2$  по длине крепления дна раструбного участка за водосбросом при работе всех трех галерей**

**Fig. 5. Change in the relative standard of pressure pulsation  $2P'/\rho v_1^2$  along the length of the fastening of the bottom of the bell section behind the spillway when all three galleries are operating**

значительно изменяются, поэтому здесь сильное влияние оказывают боковые зоны раздела, располагаемые в межтрубных областях и в местах примыкания к вертикальным стенкам раструба. В зонах с максимальными значениями стандарта спектры пульсации давления имеют преобладающие частоты  $\omega_n = 2\pi/\tau_0$ , где  $\tau_0$  – характерный период пульсации. За гасителями первого ряда оптимальное совпадение при оценке частот максимума спектра получилось при использовании известной зависимости для частот вальца над струей  $\omega_g$  [7, 14].

$$\omega_b = 2V/(h_2 - h_1) \approx (0,8...0,5) V_1/0,5L_b, \quad (2)$$

где  $V$  – вертикальная составляющая скорости в прыжке;  $h_1$  и  $h_2$  – глубины потока соответственно в начале и в конце прыжка на рассматриваемом участке;  $L_b$  – длина вальца.

Преобладающая частота высокочастотной компоненты колебаний  $\omega_n$  перед первым рядом гасителей составляет порядка 2,4...3,7 Гц, а за гасителями второго ряда – не более 0,3...0,8 Гц. Сравнение автокорреляционных функций и продольных корреляций позволило установить, что скорость сноса возмущений, зависящую от размера сносимых вихрей, для перехода от частотных спектров к продольным можно принимать за зубчатый порог равной  $\sim 0,8$ , а за выходным сечением раструба – 0,18...0,04 от локальной средней скорости течения. Это несколько ниже, чем указано в работе [10], для конца прыжка. При работе водосброса средним пролетом (режим 3) энергонесущими становятся еще более низкие частоты, что связано в основном с уменьшением средних скоростей течения [3].

В выходном оголовке расположены 6 рядов плит крепления нижнего бьефа с исследованной конструктивной схемой гасящих устройств: на водобое – 4 ряда поперек потока, на рисберме – 2 ряда размером  $2,4h_1 \times 2,4h_1$ ;  $2,0h_1 \times 2,4h_1$ ;  $3,0h_1 \times 3,0h_1$  соответственно. Результаты вычисления пульсационных нагрузок ( $P'_o$  – стандарт пульсации равномерно распределенной нагрузки, вызывающей действие на плиту такой же силы, что и фактическая вертикальная пульсационная нагрузка) и моментов ( $P'_{om}$  – стандарт пульсаций равномерно распределенной удельной нагрузки, вызывающей действие такого же опрокидывающего момента, что и фактическая пульсационная нагрузка) с учетом пространственных корреляций между колебаниями нагрузки на элементарные площадки ( $L_e = 0,6h_1$ ) представлены на рисунке 6. Анализ полученных результатов еще раз подтверждает экспериментальные данные о резком

уменьшении нагрузки с удалением от начала гидравлического прыжка.

Для плит первого ряда крепления совместно с гасителем первого ряда, испытывающих наибольшие пульсационные воздействия, совпадение с данными экспериментов Г.А. Юдицкого [11] достаточно хорошее – менее 12%. На низележащих участках водобоя и рисбермы это расхождение является более существенным и доходит до 47%, что можно объяснить уменьшением масштабов турбулентности ввиду установки зубчатых порогов и большим подтоплением по сравнению с условиями сопряжения в отмеченных работах. Если водосброс пропускает воду только одной средней галереей (режим 3), удельные нагрузки на плиты первого ряда возрастают в среднем в 1,3 раза по сравнению с работой сооружения всем фронтом (режим 1). Расчет по действующим рекомендациям [14, 15] в этом случае дает значительно заниженный результат (в 1,7 раза). Это говорит об ограничении применения данной методологии в условиях пространственного режима сопряжения бьефов при значительной степени расширения потока. Причиной некоторых расхождений может быть и то, что рекомендации [14] получены на основе амплитудного анализа без учета динамического характера загрузки.

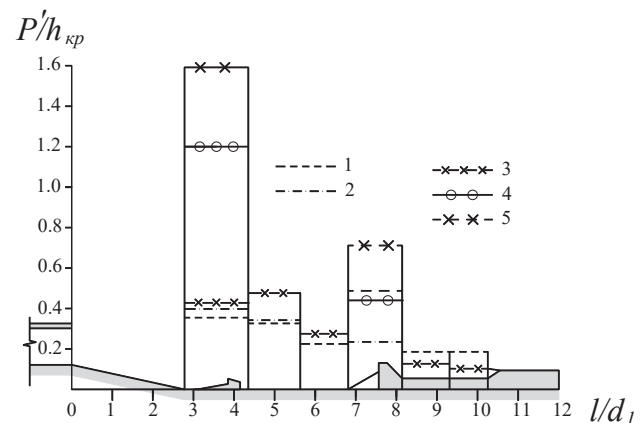


Рис. 6. Распределение удельных осредненных пульсационных нагрузок  $P'_o$  на плиты крепления дна раструба: 1 –  $P'_o$  по данным [11] для режима 1; 2 и 3 – экспериментальные данные при работе всех трех галерей  $P'_o$  и  $P'_{om}$ ; 4 и 5  $P'_o$  и  $P'_{om}$  при работе сооружения только средним пролетом

Fig. 6. Distribution of specific averaged pulsation loads  $P'_o$  on the bell bottom fastening slabs: 1 –  $P'_o$  according to data [11] for mode 1; 2 and 3 – experimental data during the operation of all three galleries  $P'_o$  and  $P'_{om}$ ; 4 and 5  $P'_o$  and  $P'_{om}$  when the structure operates only by the middle span



### Выводы

Исследования показали возможность достаточно корректной оценки пульсационных нагрузок на плиты крепления нижнего бьефа трехпролетного трубчатого водосброса Шамкирского гидроузла по известным методическим указаниям Научно-исследовательского сектора Гидропроекта и рекомендациям, но только с учетом особенностей изменения гидродинамических характеристик потока в раструбных оголовках, снабженных миксированной схемой гасящих устройств. Выявлено, что расчеты по ним дают удовлетворительные результаты лишь при работе сооружения всем фронтом и при дополнительном уточнении

некоторых параметров расчета, определяемых по результатам модельных исследований экспериментальным путем. После определения суммарных нагрузок и построения квазистатического нагружения прочность и устойчивость элементов крепления нижнего бьефа, а также выбор оптимальной конструкции всей системы «Бетонные плиты крепления-водонасыщенное грунтовое основание» можно оценивать по авторской методологии или классическими методами. Исполнение указанных рекомендаций должно обеспечить надежность и долговечность работы всего Шамкирского гидроузла в целом после завершения его полной реконструкции.

### Список использованных источников

1. Розанов Н.П. и др. Устройства нижнего бьефа водосбросов: монография / Н.П. Розанов, Н.Т. Кавешников, О.Н. Черных; Под ред. проф. Н.П. Розанова. М.: Колос, 1984. 269 с.
2. Черных О.Н., Волков В.И. Оценка безопасности водосбросных сооружений при грунтовых плотинах: Учебное пособие. М.: МГУП, 2019. 118 с.
3. Черных О.Н., Бурлаченко А.В. Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений мелиоративного гидроузла с грунтовой плотинной: учебное пособие. М.: РГАУ-МСХА, 2022. 172 с.
4. 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.
5. 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.
6. Волков В.И. и др. Открытые береговые водосбросы: учебник / В.И. Волков, О.Н. Черных, А.Г. Журавлёва, И.С. Румянцев, В.И. Алтунин. М.: МГУП, 2012. 244 с.
7. Черных О.Н., Бурлаченко А.В., Бурлаченко Я.Ю. Экспериментальные и аналитические исследования нагрузок на элементы крепления за водосбросами водных объектов АПК // *Природообустройство*. 2023. № 4. С. 12-20.
8. Сидорова С.А. Безопасность работы плит крепления нижних бьефов гидротехнических сооружений // *Природообустройство*. 2022. № 1. С. 61-65.
9. Лятхер В.М. Турбулентность в гидросооружениях: монография. М.: Энергия, 1968. 297 с.
10. Черных О.Н., Бурлаченко А.В., Бурлаченко Я.Ю. Обеспечение надежности крепления из плит за водопропускными сооружениями мелиоративных систем АПК // *Природообустройство*. 2023. № 5. С. 41-46.
11. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: справочное пособие / Под ред. Д.Д. Лапша. М.: Энергоатомиздат, 1988. 624 с.
12. Рекомендации по определению гидродинамических нагрузок, действующих на плиты водобоев и рисберм водосливных плотин. Л.: ВНИИГ, 1979. 52 с.
13. Лятхер В.М., Халтурина Н.В. Динамические нагрузки на водобой и оценка устойчивости крепления

### References

1. Rozanov N.P., Kaveshnikov N.T. and others. Design of the downstream of spillways. M.: Kolos, 1984. 269 p.
2. Chernykh O.N., Volkov V.I. Safety assessment of spillway structures for earth dams. M.: MGUP, 2019. 118 p.
3. Chernykh O.N., Burlachenko A.V. Ensuring the safety of hydraulic structures of a reclamation waterworks with an earth dam. M.: RGAU-MSHA, 2022. 172 p.
4. 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.
5. 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.
6. Volkov V.I., Chernykh O.N., Zhuravleva A.G., Rumyantsev I.S., Altunin V.I. Open coastal spillways. M.: MGUP, 2012. 244 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. Sidorova S.A. Safety of operation of slabs for fastening downstream reservoirs of hydraulic structures // *Prirodoobustroystvo*. 2022. No. 1. P. 61-65.
9. Lyather V.M. Turbulence in hydraulic structures. M.: Energy, 1968. 297 p.
10. Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Burlachenko Y.Yu. Ensuring the reliability of fastening from slabs behind culverts of reclamation systems of the agro-industrial complex // *Prirodoobustroystvo*. 2023. No. 5. P. 41-46.
11. Hydraulic calculations of spillway hydraulic structures: reference manual. Lappo D.D. M.: Energoatomizdat, 1988. 624 p.
12. Recommendations for determining hydrodynamic loads acting on the slabs of reservoirs and aprons of spillway dams. L.: VNIIG. 1979. 52 p.
13. Lyather V.M., Khalturina N.V. Dynamic loads on the water breaker and assessment of fastening stability. Proceedings of coordination meetings on hydraulic engineering. L.: Energy, 1977. Vol. 116. P. 44-55.
14. Obidov B., Vokhidov O., Shodiev B., Ashirov B., Sapaeva M. Hydrodynamic loads on a water drain with cavitation quenchers. IOP Conference Series: Materials

// Труды координационных совещаний по гидротехнике. Л.: Энергия, 1977. Вып. 116. С. 44-55.

14. **Obidov B., Vokhidov O., Shodiev B., Ashirov B., Sapaeva M.** Hydrodynamic loads on a water drain with cavitation quenchers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 883. Pp. 012011. DOI: 10.1088/1757-899x/883/1/012011.

15. 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>.

#### Об авторах

**Черных Ольга Николаевна**, 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](mailto:chernih@rgau-msha.ru)

**Бурлаченко Алёна Владимировна**, 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](mailto:chtara@mail.ru)

**Бурлаченко Ярослав Юрьевич**, соискатель; [yaroslav.burlachenko@sneak-mail.ru](mailto: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

The authors declare no conflict of interests / Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

#### Вклад авторов

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 28.02.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 19.09.2024

Принята к публикации / Accepted 19.09.2024

Science and Engineering. 2020. 883. P. 012011. DOI:10.1088/1757-899x/883/1/012011

15. Culvert hydraulic structures (spillways, water outlets and water outlets). Design rules. Set of rules. SP 290. 1325800. 2016. clause 4.11. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456074911>

#### About the authors

**Olga N. Chernykh**, CSc (Eng), associate professor; WoSResearcherID: S-2542-2018; Scopus AuthorID: 57213261727; ORCID: 0000-0003-2905-446X; SPIN-код: 7757-7969; AuthorID: 692667; [chernih@rgau-msha.ru](mailto:chernih@rgau-msha.ru)

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

**Yaroslav Y. Burlachenko**, applicant; [yaroslav.burlachenko@sneak-mail.ru](mailto:yaroslav.burlachenko@sneak-mail.ru)

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, have a copyright on the article and are responsible