

Information about the authors

Bellendir Evgeny Nikolaevich, doctor of technical sciences, general director of JSC «Design and survey and research institute Hydroproject named after S.Y. Zhuk», Moscow, Volokolamskoe shosse, 2; e-mail: hydro@hydroproject.ru

Rubin Oleg Dmitrievich, doctor of technical sciences, director of the branch of JSC «Design and survey and research institute Hydroproject named after S.Y. Zhuk» – Institute «Hydroproject – NIIES»; 125080, Moscow, Volokolamskoe highway, 2; e-mail: o.rubin@hydroproject.ru

Lisichkin Sergey Evgenievich, doctor of technical sciences, chief researcher, branch of JSC «Design and survey and research institute Hydroproject named after S.Y. Zhuk» – Institute «Hydroproject – NIIES»;

125080, Moscow, Volokolamskoe highway, 2; e-mail: lisichkin1989@mail.ru

Antonov Anton Sergeevich, candidate of technical sciences, director of the Analytical Center for Equipment Safety and GTS, a branch of the Hidroproekt Design and Survey and Research Institute named after S.Y. Zhuk – Institute «Hydroproject – NIIES», Senior Lecturer at the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering (NRU MGSU); 129337, Moscow, Yaroslavskoye Highway, 26; e-mail: Antonov.An.S@yandex.ru

Katunin Alexander Nikolayevich, Head of the Equipment and Hydraulic Structures Monitoring Service of the branch of PJSC RusHydro – Zagorskaya PSPP, 141342, Moscow Region, Sergievo-Posadsky District, pos. Bogorodskoe, 100; e-mail: KatuninAN@rushydro.ru

УДК 502/504:627.8:532.5

DOI 10.34677/1997-6011/2019-4-69-77

А.П. ГУРЬЕВ, Н.В. ХАНОВ, В.А. ФАРТУКОВ, А.С. ВЕРХОГЛЯДОВА

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования

«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

М.М. АБИДОВ

Акционерное общество «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» им. С.Я. Жука», г. Москва, Российская Федерация

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ БЕТОНА НА ПРИМЕРЕ ВОДОСБРОСА № 2 БОГУЧАНСКОЙ ГЭС

При работе поверхностных водосбросов с напорами более 50 м могут возникать кавитационные режимы, опасные эрозией бетона. Простым и эффективным способом борьбы с возникновением кавитации является устройство трамплинов-аэраторов. На физической модели проведены исследования работы аэраторов с тремя модификациями ключевых параметров. Цель проводимого исследования – определение эффективности каждой из конструкций. Все три конструкции аэраторов показали удовлетворительные параметры работы, определена наиболее эффективная схема. Анализируя работу аэраторов с позиции их физического воздействия на управляемый поток, следует отметить большую эффективность работы аэраторов с большими углами крутизны. Исследованные конструкции аэраторов, отличающихся изменением угла атаки всего на 1°, увеличивают дальность отлёта почти на 15%. Учитывая это обстоятельство, можно рекомендовать к установке на водосбросе № 2 укороченного аэратора с длиной управляющей грани $l = 1,8$ м, высотой носка $h = 0,36$ м, и углом атаки $\theta = 11,5^\circ$. Следует отметить увеличение кавитационной опасности при работе водосброса в режиме истечения из-под затвора, потому, что при сходе потока с трамплина-аэратора поток на довольно большом расстоянии (тем больше, чем тоньше струя) отрывается от водосливной поверхности. На этом участке нижняя поверхность потока контактирует с воздухом, который вовлекается в движение в виде спутной струи со скоростью, мало отличающейся от скорости воды на контакте с водяным потоком. Вследствие этого резко замедляется процесс турбулизации потока и его способность к самоаэрации. Это снижает сопротивляемость тонких потоков процессам кавитации.

Кавитация, аэрация потока, носок-трамплин, наклонная грань водосброса, отводящий участок, свободная поверхность потока, глубина потока, поверхностная скорость, придонная скорость

Введение. Изучение явления кавитации интенсивно началось в 60...70-е годы прошлого века. В настоящее время этот процесс достаточно хорошо изучен, разработано довольно большое количество приёмов по борьбе с кавитацией.

В наиболее полном и одновременно сжатом виде основные меры борьбы с кавитационной эрозией бетона сформулированы Слисским С.М. в [1]. Ниже перечислены эти меры.

1. Задание таких форм, размеров элементов, гидравлических режимов, при которых исключается появление кавитации.

2. Придание элементам сооружения очертаний, создающих эффект суперкавитации.

3. Применение специальных кавитационностойких покрытий – стальных, полимерных, резиновых.

4. Выравнивание поверхностей водопропускных трактов.

5. Применение бетонов с повышенной кавитационной стойкостью.

6. Подвод воздуха в область вакуума – аэрация потока у твёрдых границ.

Из перечисленных мер борьбы с кавитацией не все применимы для водосбросных плотин. Наибольшее распространение получили последние три способа, но и они не равноценны. Так, выравнивание поверхностей

водопропускных трактов можно считать временной мерой, поскольку открытые поверхности водосливных плотин, особенно в суровых климатических условиях подвержены эрозии, сводящей со временем на нет эффективность выравнивания.

Более надёжным является применение бетонов с повышенной кавитационной стойкостью, к которым относятся бетоны с повышенной маркой прочности на мелком заполнителе. Недостатком этого способа является его дороговизна.

Вторым популярным способом, который при правильном применении оказывается наиболее эффективным и наиболее дешёвым, является подвод воздуха в область вакуума.

Наибольший эффект даёт сочетание этих трёх способов.

При оценке опасности кавитационной эрозии следует учитывать также тот факт, что развитие кавитации не определяется однозначно коэффициентом кавитации, поскольку разрушительной кавитация становится при скоростях потока выше пороговой, при которой материал перестаёт сопротивляться разрушению.

В таблице приведены данные о величине пороговой скорости для бетонов различного класса в зависимости от насыщения воздухом потока при достаточно низком коэффициенте кавитации $\beta = 0,35$.

Таблица

Пороговые скорости бетона при различном воздухоудержании

Воздухоудержание %	Пороговая скорость, м/с			
	Класс бетона			
	B12,5	B22.5	B30	B40
0.0	7.5	13.0	17.5	22.0
4.0	14.0	20.0	24.0	28.5
8.0	22.0	27.5	32.0	-

Из таблицы видно, что на горизонтальном участке водосливной поверхности скорость в потоке не должна достигать 35 м/с, которой без специальных мероприятий не может противостоять даже бетон класса B40.

Таким образом, для защиты от кавитационной коррозии требуется нижнюю часть водосливной поверхности водосброса № 2 выполнить из бетона класса B40 и обеспечить подачу воздуха в зону контакта воды с бетоном.

В настоящих исследованиях предусмотрено устройство трамплинов – аэраторов.

Материалы и методы исследований.

На рисунке 1 представлена модельная установка с нижнего бьефа.

Основным методом изучения гидравлической картины на водопропускном тракте водосброса № 2 было принято визуальное наблюдение с фиксацией процессов на цифровую камеру с последующей обработкой результатов наблюдений на компьютере. Такой метод даёт широкие возможности для изучения всех гидравлических явлений: в руках исследователей имеется документальная фиксация изучаемых процессов; имеется возможность внесения коррективов

в визуальное восприятие наблюдаемых процессов.

Высокие водосливные плотины являются источником опасного кавитационного воздействия потока на водопропускной тракт.

Исследования разных авторов [2, 3] показали, что кавитационная эрозия может возникнуть при скорости течения воды более 12-15 м/с, а ее интенсивность возрастает пропорционально величине скорости в 5-7 степени.

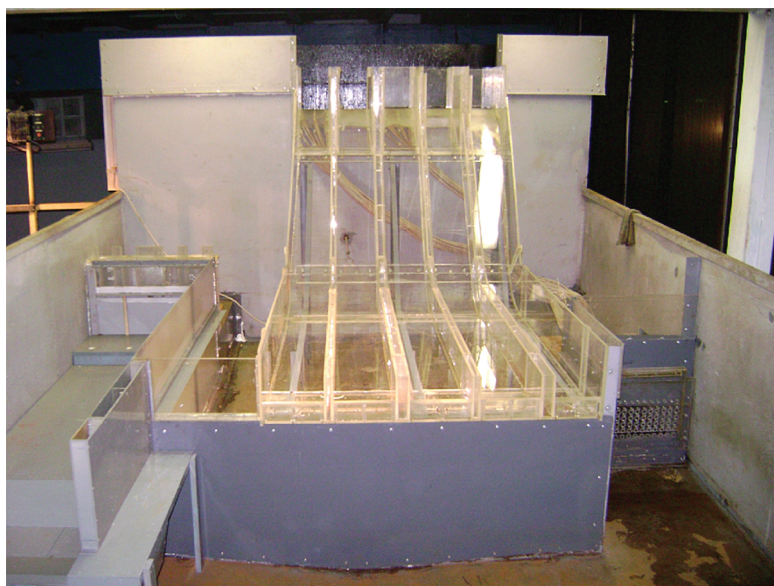


Рис. 1. Вид на модельную установку с нижнего бьефа

Наличие на бетонной поверхности водослива неровностей и плохо обтекаемых конструктивных элементов является источником возникновения кавитации и последующего возможного разрушения водослива. Разные публикации в технической литературе показали, что кавитационные каверны могут достигать глубины 2 м за относительно короткое время, а ремонт таких разрушений требует значительных капиталовложений.

Результаты исследований. Для борьбы с кавитационной эрозией на неровностях и на конструктивных элементах эффективным и экономичным средством считается принудительное насыщение воздухом (аэрация) потока по глубине. При достаточном содержании воздуха в потоке отдельные неровности на поверхности водослива или чрезмерная общая шероховатость не вызывают кавитационной эрозии. При насыщении воды воздухом в количестве 7-8% кавитационная эрозия бетонной поверхности прекращается [4, 5, 6, 7].

При определенных условиях поступление воздуха в поток на водосливе может происходить естественным путем без оборудования плотины специальными устройствами. Условием проникновения воздуха в поток является не только выход турбулентных

возмущений на свободную поверхность, но и достижение на поверхности скоростей примерно 3-4 м/с [1]. В этой работе также рассмотрены эмпирический критерий начала аэрации Н.Б. Исаченко и критерий, полученный теоретическим путем В.Г. Войнич-Сяноженцким. Сложность получения надежного критерия начала аэрации эмпирическим путем и проверки достоверности теоретических расчетов заключается в том, что воспроизвести процесс аэрации на модели, отвечающей натуре, не представляется возможным, а получение натуральных данных затруднительно.

Выполненные расчеты начала аэрации по зависимостям Войнич-Сяноженцкого показали, что при свободном переливе воды через водоброс № 2 поток в пролетах шириной 12,5 м достигает границы аэрации на расстоянии 50...55 м от начала криволинейного участка водоската (начала очертавания водослива по Кригеру-Офицерову). Средние скорости в этом промежутке сечений превышают 30 м/с. Левее этой границы на участке длиной 20...25 м средние скорости превышают 22 м/с, что для поверхности из бетона даже класса В40 является кавитационно опасным [1].

В пролете № 1 шириной 9,5 м по результатам расчетов отсутствует самоаэрация

потока. При истечении из-под затвора, в зависимости от открытия последнего, самоаэрация потока начинается или непосредственно у затвора или близко от него. По расчетам, максимальная глубина аэрированного потока превышает 3 м при ФПУ = 209,5 м.

Расчеты кривых свободной поверхности неаэрированного потока показали, что при ФПУ минимальные глубины равны 1,41 и 1,81 м, а максимальные –1,91 м и 2,22 м, соответственно, для пролетов 12,5 м и 9,5 м, что подтверждено замерами глубин на модели для соответствующих режимов.

Как следует из выше изложенного, при свободном переливе воды через водослив при расчетных расходах имеется потенциальная опасность кавитационных разрушений на сливной поверхности. Возникает необходимость искусственного ввода воздуха в поток. Для этого нами использованы клиновидные трамплины-аэраторы на водосливной поверхности водосброса № 2 в четырех пролетах – 1, 2, 4 и 5. Для сравнительного анализа гидравлических условий работы всех пяти пролетов третий пролет оставили без аэратора. Кромки носка аэратора размещены в створе соединяющих граней разделительных бычков (рис. 3) с отметкой поверхности водослива 184,04 м. Исследованы аэраторы разной конструкции. В первом и четвертом пролетах аэраторы имели одинаковую геометрическую форму с $h = 0,36$ м, $\theta = 10^\circ$ и длиной управляющей грани $\ell = 34,5$ мм (2,07 м в натуре). Во втором пролете $h = 0,36$ м, $\theta = 10,8^\circ$ и $\ell = 32$ мм (1,92 м в натуре); в пятом пролете $h = 0,36$ м, $\theta = 11,5^\circ$ и $\ell = 30$ мм (1,8 м в натуре). Поскольку плановые очертания всех пяти пролетов отличаются, такая схема использования аэраторов позволяет получить более полную картину влияния последних на гидравлическую структуру переливающегося потока.

Трамплин-аэратор отрывает струю от сливной грани и под струей образуется воздушная полость с давлением, как правило, ниже атмосферного. На модели водосброса № 2 воздушная полость непосредственно соединялась с полостью, образующейся при отрыве потока от боковых граней разделительных бычков, т.е. воздух свободно поступал в подструйное пространство. Глубина уступов в поперечном направлении составляла по 0,5 м в обе стороны в пролетах 2, 3 и 4 по данным проекта. Расширение пролетов № 1 и № 5 было односторонним: в пролете № 1 левая стенка не только не имела

уступа, но ещё была направлена внутрь потока. Уступ имелся только со стороны правого разделительного быка. В пролёте № 5, наоборот, уступ имелся слева также в разделительном быке. Правая стенка имея отклонение, наружу от потока, способствовала тем самым его отрыву на изломе.

Практически при всех режимах работ водосброса № 2, на уступах происходил отрыв потока от боковых граней разделительных бычков. Но при дальнейшем движении воды под действием внутренних напряжений в потоке происходило его расширение и примыкание к боковым граням разделительных стен пролётов. Длина зоны свободного полёта боковых поверхностей потока составляла порядка 5...6 см, чему в натуре соответствует длина 3.0...3.6 м. Площадь сечения создаваемого при этом вертикального воздушного канала, сообщающегося с подструйным пространством, составляла порядка 1.2...1.5 м² в пересчёте на натурные условия.

Образование вакуума в подструйном пространстве связано с выносом воздуха струей в зоне его защемления при контакте нижней поверхности струи с поверхностью водоската.

Скорость воздуха под действием перепада давления Δp м. вод.ст. определяется по зависимости:

$$V_{\text{возд}} = \varphi \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta p \cdot \frac{\gamma_{\text{вод}}}{\gamma_{\text{возд}}}} \text{ м/с}, \quad (1)$$

где φ – коэффициент скорости воздухоподводящей системы; $\gamma_{\text{вод}} = 1000$ кг/м³ – плотность воды; $\gamma_{\text{возд}} = 1,28$ кг/м³ – плотность воздуха.

При этих значениях плотности воды и воздуха получаем

$$V_{\text{возд}} = 123.8 \cdot \varphi \cdot \sqrt{\Delta p} \text{ м/с}. \quad (2)$$

Для оценки величины создаваемого вакуума в подструйном пространстве при отрыве аэратором потока от сливной грани водосброса в створе торцевой грани аэраторов на сливной поверхности водосброса в каждом пролёте было установлено по 3-и пьезометра: на расстоянии 0,5 м от боковых стен и по оси пролётов. Определение вакуума выполнялось с помощью наклонного U-образного водяного наклонного манометра. Наклон манометра к горизонту составлял 1:10 для повышения точности замеров.

В первом пролете у правой разделительной стенки в зоне воздушного вертикального канала замеры показали наличие вакуума порядка 0,05 м. вод.ст. в натуре в подструйной полости.

Величина вакуума в остальных пролетах в полости за аэратором составляла 0.006...0.008 м. вод.ст. в натуре.

Приняв значение коэффициента скорости $\varphi = 1$ ввиду малости длины воздушных каналов, получаем для крайнего пролёта скорость воздуха $V_{\text{возд.1}} = 27,7 \text{ м/с}$ и 11 для средних пролётов. Этим скоростям воздуха соответствует его расход порядка $Q_{\text{возд}} = 27,7 \times 1,5 = 40 \text{ м}^3/\text{с}$ для крайних пролётов и $Q_{\text{возд}} = 11 \times 1,5 \times 2 = 33 \text{ м}^3/\text{с}$ для средних пролётов. Вакуум в подструйном пространстве практически не зависел от расхода, так что отношение расхода воздуха к расходу воды являлся переменной величиной. При свободном переливе оно составляло 5,5...8% для крайних пролётов и 4,7...6,6% для средних пролётов.

В специальной литературе, как и в таблице 1, приводятся в некотором смысле анонимные данные о концентрации воздуха, поскольку нет чёткости постановки вопроса: это концентрация воздуха в средней по объёму струе или в пограничном слое потока на контакте с ограничивающими его поверхностями.



Рис. 2. Вид на нижнюю поверхность потока в пролёте № 1 при $УВБ = НПУ = 208,0 \text{ м}$ и свободном переливе

Очевидно, что на сдерживание процессов развития кавитации влияет тот воздух, который и содержится в этих слоях. В таком случае, количества захватываемого воздуха вполне достаточно для предотвращения процесса кавитации.

Визуальные наблюдения и замеры показали, что в створе, где оторванная трамплином-аэратором струя примыкает к водосливу, происходит захват воздуха потоком и далее водовоздушная смесь движется вниз по сливной грани. На рисунке 2 представлено фото вида на нижнюю поверхность потока в пролёте № 1 в зоне “приземления” струи на сливную поверхность. Как и следовало ожидать, линия контакта нижней поверхности струи проходит под углом порядка 55...60° к оси потока. На оси в пролете длина воздушного подструйного пространства достигает 30 см на модели или 18 м в натуре. У левой стенки она уменьшается до 15 м вследствие торможения струй, соприкасающихся с левой боковой стенкой.

На рисунке 3 показано фото подструйных воздушных мешков во всех пяти пролётах. Максимальная величина воздушного пространства при отклонении струй трамплином-аэратором наблюдается при истечении из-под затвора с минимальными его открытиями, поскольку при уменьшении толщины струи угол её отклонения от первоначальной траектории всё больше приближается к углу отклоняющей поверхности трамплина.

Содержание воздуха у дна в месте примыкания струи к водосливу по экспериментальным данным [8] может достигать 80...90%. При движении водо-воздушной смеси по водосливу пузырьки воздуха из придонного турбулентного слоя всплывают в потенциальное ядро и далее покидают поток через свободную поверхность. Таким образом, происходит деаэрация придонного слоя.

Протяженность участка водослива, защищаемого аэратором от кавитационной эрозии, складывается из длины участка подструйной воздушной полости и длины участка деаэрации потока, в конце которого придонная концентрация воздуха соответствует требуемому значению из условия недопущения кавитационного разрушения. При работе трамплинов-аэраторов уменьшение содержания воздуха при движении воды по сливной поверхности невелико. По натурным исследованиям осредненные

по глубине удельные потери воздуха при работе одного трамплина составляют 0,4...0,5% на длине 1м водосбросного тракта.

Потери воздуха у дна в потоке толщиной около 1 см в 1,5...2 раза выше, чем в остальном пристенном слое.

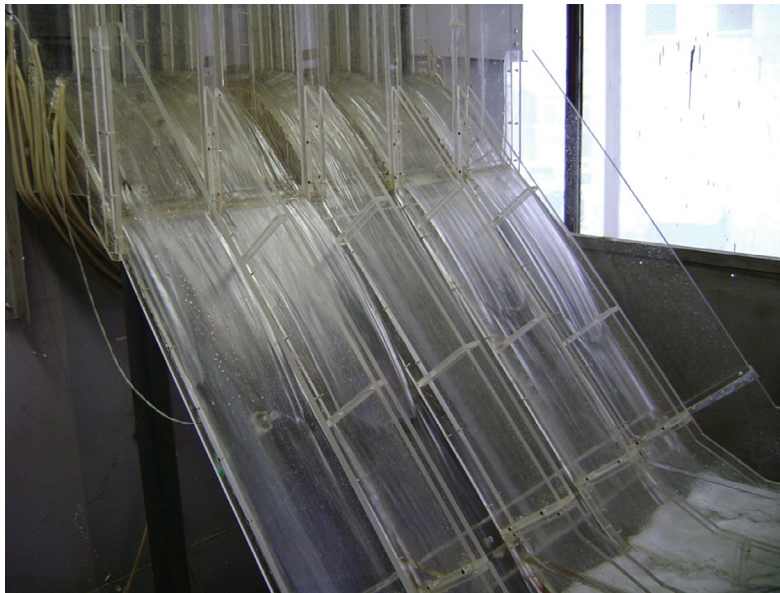


Рис. 3. Вид сверху на подструйные воздушные мешки за аэраторами во всех пяти пролётах

Выполним расчет протяженности участка водослива, защищаемого трамплином-аэратором в 1 и 5 пролетах при ФПУ.

Исходные данные: пролет № 1; $H = 10,5$ м; $Q = 700$ м³/с; по результатам замеров: длина подструйной воздушной полости $\ell = 15$ м; глубина водо-воздушного потока в месте “приземления” струи к дну изменяются от 2,4 м до 3,9 м из-за образования косых волн на поверхности потока, а ширина пролета $b = 10,7$ м в створе примыкания струи к водосливу при $X = 28,38$ м (расстояние по горизонтали от начала криволинейного участка по Кригеру-Официрову) $V = 27$ м/с (рис. 3 [4]). Примем потери воздуха у дна водосливной грани – 0,8% на 1 пог.м.

В этом случае средняя глубина неаэрированного потока в рассматриваемом створе $h = \frac{Q}{bV} = \frac{q}{V} = 2,42$ м. Из сравнения глубин видно, что за трамплином поток насыщается воздухом. Длина участка водослива от конца воздушной полости до начала горизонтального участка с абсолютной отметкой 139,5 м составляет 51,52 м. В начале участка примем содержание воздуха $C = 70\%$, тогда в конце получим: $C = 70\% - 0,8\% \times 51,52 = 28,78\%$.

Далее при движении жидкости по горизонтальной сливной грани в сечении

на расстоянии 26 м от конца сопрягающего участка содержание воздуха уменьшается до 8% – границы безопасной с кавитационной точки зрения работы водосброса.

Для пролета № 5 при $H = 10,5$ м; $Q = 700$ м³/с; по результатам замеров: длина подструйной воздушной полости $\ell = 18$ м; глубины водо-воздушного потока в месте “приземления” струи к дну изменяются от 2,2 м до 3,3 м из-за образования косых волн на поверхности потока, ширина пролета $b = 11,7$ м; в створе примыкания струи к водосливу при $X = 30,31$ м, $V = 23$ м/с (см. рис. 3-11 [4]); примем потери воздуха у дна водосливной грани – 0,8% на 1 пог.м. Тогда средняя глубина неаэрированного потока в этом створе $h = \frac{Q}{bV} = \frac{q}{V} = 2,6$ м.

Длина участка водослива от конца воздушной полости до начала горизонтального участка с абсолютной отметкой 139,5м составляет 49,24м. Содержание воздуха в конце участка составит: $C = 70\% - 0,8\% \times 49,24 = 30,6\%$. В сечении на расстоянии 28 м от конца сопрягающего участка содержание воздуха уменьшится до 8%.

Выводы

1. Анализируя работу аэраторов с позиции их физического воздействия на управляемый поток, следует отметить

большую эффективность работы аэраторов с большими углами крутизны. Исследованные конструкции аэраторов, отличающихся изменением угла атаки всего на 1° , увеличивают дальность отлёта почти на 15%, что безусловно является положительным фактором.

Учитывая это обстоятельство, можно рекомендовать к установке на водо-сбросе № 2 укороченного аэратора с длиной управляющей грани $\ell = 1,8$ м, высотой носка $h = 0,36$ м, и углом атаки $\theta = 11,5^\circ$.

2. При общем положительном влиянии аэраторов на кавитационную обстановку, следует отметить увеличение кавитационной опасности при работе водосброса в режиме истечения из-под затвора. Это связано с тем, что при сходе потока с трамплина-аэратора поток на довольно большом расстоянии (тем большем, чем тоньше струя) отрывается от водосливной поверхности. На этом участке нижняя поверхность потока контактирует с воздухом, который вовлекается в движение в виде спутной струи со скоростью, мало отличающейся от скорости воды на контакте с водяным потоком. Вследствие этого резко замедляется процесс турбулизации потока и его способность к самоаэрации. Это снижает сопротивляемость тонких потоков процессам кавитации.

По этой причине желательно избегать режимов работы с истечением из-под затвора.

Библиографический список

1. Слисский С.М. Гидравлические расчёты высокоскоростных гидротехнических сооружений / Слисский С.М. – М.: Энергоатомиздат, 1979. – 304 с.

2. Богомолов А.И., Боровков В.С., Майрановский Ф.Г. Высокоскоростные потоки со свободной поверхностью. – М.: Стройиздат, 1979 – 344 с.

3. Особенности движения воздухонасыщенного потока воды в высоконапорных вихревых водосбросах / Волшаник В.В., Зуйков А.Л., Куприянов В.П. и др. / Сб. Безопасность энергетических сооружений. Научн.-техн. и производствен. Ч.2./науч. ред. И.В. Семенов. – М.: МГУП, 2010. – С. 236-251.

4. Разработка и гидравлическое обоснование конструкции водосброса № 2 с отбросом струи в русло реки и гидравлические исследования деформации в нижнем бьефе Богучанской ГЭС. Этап 1.1: Научный анализ проектных решений водосброса № 2 Богучанской ГЭС / Козлов Д.В., Румянцев И.С.,

Гурьев А.П., Ханов Н.В. и др. Отчет о НИР – М.: МГУП, 2007.

5. Разработка и гидравлическое обоснование конструкции водосброса № 2 с отбросом струи в русло реки и гидравлические исследования деформации в нижнем бьефе Богучанской ГЭС. Этап 1.2: Оптимизация конструкции и исследование гидравлических условий работы водосброса № 2 с отбросом струи в русло реки в период эксплуатации и в период наполнения водохранилища / Козлов Д.В., Румянцев И.С., Гурьев А.П., Ханов Н.В., Абидов М.М. и др. Отчет о НИР – М.: МГУП, 2008.

6. Толошинов А.В. Выбор конструкции концевой конструкции поверхностного водосброса № 2 Богучанской ГЭС / А.П. Гурьев, Д.В. Козлов, Н.В. Ханов, А.Н. Волыничков // Гидротехническое строительство. – 2009. – № 3. – С. 10-15.

7. Модельные гидравлические исследования водосброса № 2 Богучанской ГЭС с отбросом струи с длинными разделительными стенками / А.П. Гурьев, И.С. Румянцев, Д.В. Козлов и др. // Приволжский научный журнал. – 2009. – № 1. – С. 57-65.

8. Семенов В.М., Лентяев Л.Д. Водосливная плотина с аэрацией сбросного потока // Гидротехническое строительство. – 1973. – № 5. – С. 80-85.

Материал поступил в редакцию 10.06.2019 г.

Сведения об авторах

Гурьев Алим Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры комплексного использования водных ресурсов ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, 19; e-mail: alim_guryev@mail.ru

Ханов Нартмир Владимирович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Гидротехнических сооружений» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, 19; e-mail: Nvkhanov@yahoo.com

Фартуков Василий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры гидротехнических сооружений, 127550, г. Москва, ул. Б. Академическая, 44, e-mail: fartukov@rgau-msha.ru

Верхоглядова Александра Сергеевна, старший преподаватель кафедры инженерных конструкций ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, 19; e-mail: asverhogladova@yandex.ru

Абидов Мурат Мухамедович, кандидат технических наук, доцент кафедры ФГБОУ ВОРГАЗУ, ведущий инженер АО «Проектно-исследовательский и научно-исследовательский

институт «Гидропроект» им. С.Я. Жука», Гидротехнический отдел № 2; 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.2; e-mail: m.abidov@hydroproject.ru

A.P. GURJEV, N.V. KHANOV, V.A. FARTUKOV, A.S. VERHOGLYADOVA

Federal state budgetary institution of higher education «Russian state agrarian university – MSHA named after C.A. Timiryazev», Moscow, Russian Federation

M.M. ABIDOV

Public company «Design and research institute «Hydroproject» named after S.Ya. Zhuk», Moscow, Russian Federation

RECOMMENDATIONS ON PREVENTION FROM CONCRETE CAVITATION EROSION BY AN EXAMPLE OF SPILLWAY NO. 2 OF BOGUCHANSKAYA HYDROPOWER PLANT

Surface spillways with a head over 50 m may cause cavitation conditions dangerous by concrete erosion. A simple and effective way to fight the occurrence of cavitation is a device of jump – aerators. The physical model was used to study the operation of aerators with three modifications of key parameters. The aim was to determine the efficiency of each of the structures. All three designs of aerators showed satisfactory parameters of work, the most effective scheme is defined. When analyzing the operation of aerators from the position of their physical impact on the controlled flow, it is necessary to pay attention to the high efficiency of aerators with wide sloping angles. The studied designs of aerators, which differ in the attack angle by only 1°, increase the flying away distance by almost 15%. Considering this fact, it is possible to recommend the installation of a shortened aerator with the length of the control face $l = 1.8$ m, bucket height $h = 0.36$ m, and the angle of attack $\theta = 11.5^\circ$ at the spillway № 2. It is necessary to note the increased cavitation danger at the spillway operation in the mode of discharge from under floodgates because at the water flow from the jump-aerator the stream at a rather large distance (the more the distance there the thinner the stream) is detached from the spillway surface. In this section the lower surface of the flow contacts the air which is involved in the movement in the form of a jet at a speed slightly different from the water flow speed. As a result, the turbulence of the flow and its ability to self-aeration are sharply slowed down. This reduces the resistance of thin streams to cavitation processes.

Cavitation, flow aeration, bucket, spillway inclined face, outlet section, free flow surface, flow depth, surface velocity, bottom velocity.

References

1. **Slissky S.M.** Gidravlicheskie raschety vysokoskorostnyh gidrotehnicheskikh sooruzhenij / Slissky S.M. – M.: Energoatomizdat, 1979.

2. **Bogomolov A.I., Borovkov V.S., Mairanovsky F.G.** Vysokoskorostnye potoki so svobodnoj poverhnost'yu. – M.: Strojizdat, 1979.

3. Ossobennosti dvizheniya vozduhonasyshchennogo potoka vody v vysokonapornyh vihrevykh vodosbrosah / Volshannik V.V., Zujkov A.L., Kuproyanov V.P. i dr. / Sb. Bezopasnost energeticheskikh sooruzhenij. Nauchn.-tehn. i proizvodstven. Ch.2. / nauch. red. I.V. Semenov. – M.: MGUP, 2010. – S. 236-251.

4. Razrabotka i gidravlichesкое obosnovanie konstruktsii vodosbrosa № 2 s otbrosom strui v ruslo reki i gidravlicheskie issledovaniya deformatsii v nizhnem bjefe Boguchanskoj

GES. Etap 1.1: «Nauchny analiz proektsnyh reshenij vozduhonasyshchennogo potoka vody v vysokonapornyh vihrevykh vodosbrosa № 2 Boguchanskoj GES». / Kozlov D.V., Rummyantsev I.S., Gurjev A.P., Khanov N.V. i dr. Otchet o NIR. – M.: MGUP, 2007.

5. Razrabotka i gidravlichesкое obosnovanie konstruktsii vodosbrosa № 2 s otbrosom strui v ruslo reki i gidravlicheskie issledovaniya deformatsii v nizhnem bjefe Boguchanskoj GES. Etap 1.2: «Optimizatsiya konstruktsii i issledovanie gidravlicheskih uslovij raboty vodosbrosa № 2 s otbrosom strui v ruslo reki v period ekspluatatsii i v period napolneniya vodohranilishcha». / Kozlov D.V., Rummyantsev I.S., Gurjev A.P., Khanov N.V., Abidov M.M. i dr. Otchet o NIR. – M.: MGUP, 2008.

6. **Toloshinov A.V.** Vybor konstruktsii kontsevogo ustroistva poverhnostnogo vodosbrosa № 2 Boguchanskoj GES/A.P. Gurjev, D.V. Kozlov,

N.V. Khanov, A.N. Volynchikov // M.: Gidrotehnicheskoe stroitelstvo. – 2009. – № 3. s. 10-15.

7. Modelnye gidravlicheskie issledovaniya vodosbrosa № 2 Boguchanskoj GES s otbrosom strui s dlinnymi razdelitelnymi stenkami / A.P. Gurjev, I.S. Rummyantsev, D.V. Kozlov i dr. // Privolzhsky nauchny zhurnal. – 2009. – № 1. s. 57-65.

8. **Semenkov V.** Gidrotehnicheskoe stroitelstvo. – 1973. – № 5. – S. 80-85.

The material was received at the editorial office
10.06.2019 g.

Information about the authors

Gurjev Alim Petrovich, doctor of technical sciences, professor of the department of complex usage of water resources, FSBEI HE RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, 19; e-mail: alim_guryev@mail.ru

Khanov Nartmir Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, head

of the department hydro engineering structures, FSBEI HE RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, 19; e-mail: e-mail: Nvkhanov@yahoo.com

Fartukov Vasilij Alexandrovich, candidate of technical sciences, associate professor of the department hydro engineering structures, 127550, Moscow, ul. B. Academicheskaya, 44, e-mail: fartukov@rgau-msha.ru

Verhoglyadova Alexandra Sergeevna, senior lecturer of the department of engineering structures FSBEI HE RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, 19; e-mail: asverhoglyadova@yandex.ru

Abidov Murat Muhamedovich, candidate of technical sciences, associate professor of the department FSBEI HE RGAZU, leading engineer AO «Design and research institute «Hydroproject», Hydrotechnical department № 2; 125993, Moscow, Volokolamskoe shosse, dom 2; e-mail: m.abidov@hydroproject.ru