

ul. Sobornaya, d.11; tel.: 380975642592,
e-mail: l.a.volkova@nuwm.edu.ua

Trofimchuk Dmitrij Nikolaevich,
post-graduate student of the chair of environ-

mental engineering and water conservation,
NUVHP, Ukraine, 33028, Rovno, ul. Sobor-
naya, d.11; tel.: 380 (067) 8411321; e-mail:
dmitro_trofimchuk_91@mail.ua

УДК 502/504:627.83: 532.533

В.А. ЗИМНЮКОВ, М.И. ЗБОРОВСКАЯ, А.И. ЗАЙЦЕВ

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГЛУБИННОГО ВОДОСБРОСА С СЕГМЕНТНЫМ ЗАТВОРОМ

Рассмотрена работа высоконапорного глубинного водосброса с сегментным затвором, наличием порога и диффузорной несимметричной отводящей частью при пропуске максимального расчётного расхода с определением возможности возникновения кавитации. В качестве примера анализируется пропуск паводка через гидроузел. Выявляются причины возникновения кавитации в отводящем водосбросном тракте с определением скоростного режима и изучением пьезометрических напоров в расчётных створах на основе данных, полученных при работе модели водосброса масштаба М 1:50. Анализ полученных данных показывает, что при заданных условиях работы водосброса кавитация будет возникать при наличии любого потенциального возбудителя в безнапорной части водосброса при расходе сбрасываемого потока свыше 400 м³/с. Для исключения возможности образования кавитации и обеспечения безаварийной эксплуатации водосброса необходимо изменить конструкцию отводящей части водосброса (сгладить повороты, расширение диффузорной части сделать более плавным, заменить материалы на более кавитационностойкие, уменьшить шероховатость поверхности бетона путём полировки/шлифовки) или изменить характеристики потока воды (увеличить степень аэрированности потока, уменьшить скорость потока). Также рекомендуется уменьшить пропускаемый расход воды с увеличением срока попуска паводка и значительным предпаводковым опорожнением водохранилища в многоводные годы. Результаты эксперимента совпадают с ситуаций на натурном объекте: в расчётном створе, где наблюдается сильное падение избыточного давления воды, на натурном объекте зафиксированы кавитационные каверны в боковых стенках и дне водосброса.

Курпсайский гидроузел, глубинный водосброс, кавитация, модельные исследования, модель глубинного водосброса, гидравлические исследования, скорость потока.

Введение. Вероятность возникновения кавитации в тракте глубинного водосброса обеспечена не только недостатками выполнения работ и эксплуатацией водосброса с забитыми воздуховодами, но и с существующими вопросами по принятым проектным решениям. Дальнейшее изучение и проведение опытов позволят уточнить предлагаемые методы решения вопроса.

Стоит отметить, что ввиду столь маленького масштаба модели непосредственно моделировать кавитацию и аэрацию невозможно, но есть вероятность получения данных о гидравлических характеристиках потока, на анализе которых станет ясно поведение потока на натурном сооружении. Результаты эксперимента совпадают с ситуаций на натурном объекте: в расчётном

створе, где наблюдается сильное падение избыточного давления воды, на натурном объекте зафиксированы кавитационные каверны в боковых стенках и дне водосброса.

При скоростях потока до 15 м/с такие явления, как кавитация, аэрация и пульсационные нагрузки, не оказывают существенного влияния на нормальную работу сооружения и поэтому при проектировании обычно не учитываются. При скорости потока более 25 м/с, для обеспечения нормальной работы водопропускных сооружений, необходимо принимать особые меры по учёту воздействия кавитации. Проектирование высоконапорных водосбросов без учёта указанных особенностей высокоскоростных потоков может привести к тяжёлым повреждениям и авариям на водосбросных сооружениях [1, 2]. Предполагает-

ся, что интенсивность кавитационной эрозии зависит от скорости в степенной зависимости с показателем степени от 4 до 8,5, и вопрос требует дальнейшего уточнения.

Объект исследования. Глубинный водосброс Курпсайской ГЭС (рис. 1) предназначен для пропуска паводков из водохранилища в нижний бьеф при проектном рас-

четном расходе $Q_n = 1037 \text{ м}^3/\text{спр}$ и НПУ [2-5]. Несмотря на то, что максимальный расход воды, пропускавшийся через водосброс, составил $Q_n = 600 \text{ м}^3/\text{с}$ (что составляет 58% от проектного расчетного расхода), в отдельных зонах водосброса возникла кавитационная эрозия [4], зоны которой на рисунке 1 заштрихованы (зона разрушения).

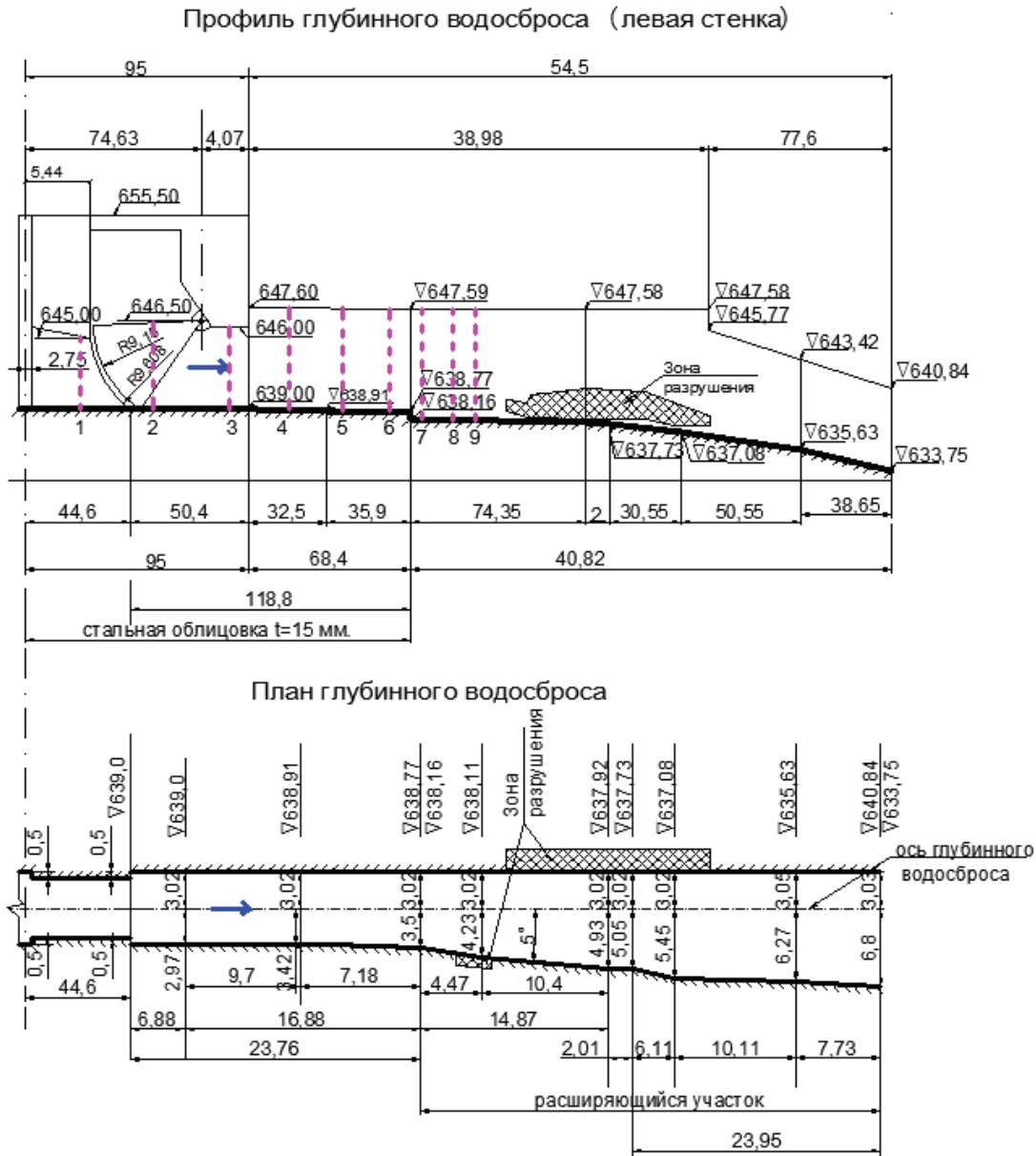


Рис. 1. Затворная камера и диффузорный участок глубинного водосброса

Примечание. Размеры и высотные отметки даны в метрах:

⋮ – створы пьезометров на модели; 1 – номер створа пьезометров;

→ – направление движения воды.

По результатам обследования в 2003-2004 гг. водосброса после пропуска максимально пропускавшегося расхода в $Q_n = 600 \text{ м}^3/\text{с}$ установлено следующее. Из-за неровностей и выступов бетонной поверхности водосброса возможно появление локальных кавитационных зон, но неоднократ-

ное образование на протяжении многих лет крупных (до 1,5 м в глубину) кавитационных каверн в одних и тех же местах свидетельствует о том, что причина появления кавитационной эрозии носит систематический характер и связана не только с дефектами бетонной поверхности, но и с гидравлическим режимом

работы водосброса. В связи с этим представляет интерес изучение гидравлических особенностей работы глубинного водосброса с точки зрения образования кавитации как при пропуске проектного расчётного расхода, соответствующего НПУ $Q_H = 1037 \text{ м}^3/\text{с}$, так и при меньших расходах, вплоть до $400 \text{ м}^3/\text{с}$ (максимальный расход, при котором явление кавитации не фиксировалось). Гидравлический режим потока и его скоростной режим позволяют, таким образом, косвенно судить о возможностях и причинах появления и развития кавитации в местах выявленных разрушений стенок водосброса, без прямого физического моделирования возникновения кавитации.

Методика проведения исследований. Для проведения исследований использовали модель глубинного водосброса в масштабе 1:50, изготовленную из оргстек-

ла. Все детали модели выполнены согласно чертежам, модель собрана на опорной металлической ферме гидравлического стенда выставлена под уровень [3] и оборудована измерительной аппаратурой (пьезометры, трубка Пито, микровертушка для измерения скоростей потока).

Рассмотрим работу водосброса при полностью открытом сегментном затворе и при пропуске проектного расхода $Q_H^{НПУ} = 1037 \text{ м}^3/\text{с}$. Для модели он составляет $Q_M = 0,05866 \text{ м}^3/\text{с}$.

Рассмотрим в качестве расчётного створ пьезометров № 7 (рис. 2а), который соответствует расчётному сечению 2-2 для натурного сооружения (рис. 2б).

В работах [5-7] проведен расчет глубинного водосброса с учетом величины открытия сегментного затвора (рис. 2б).

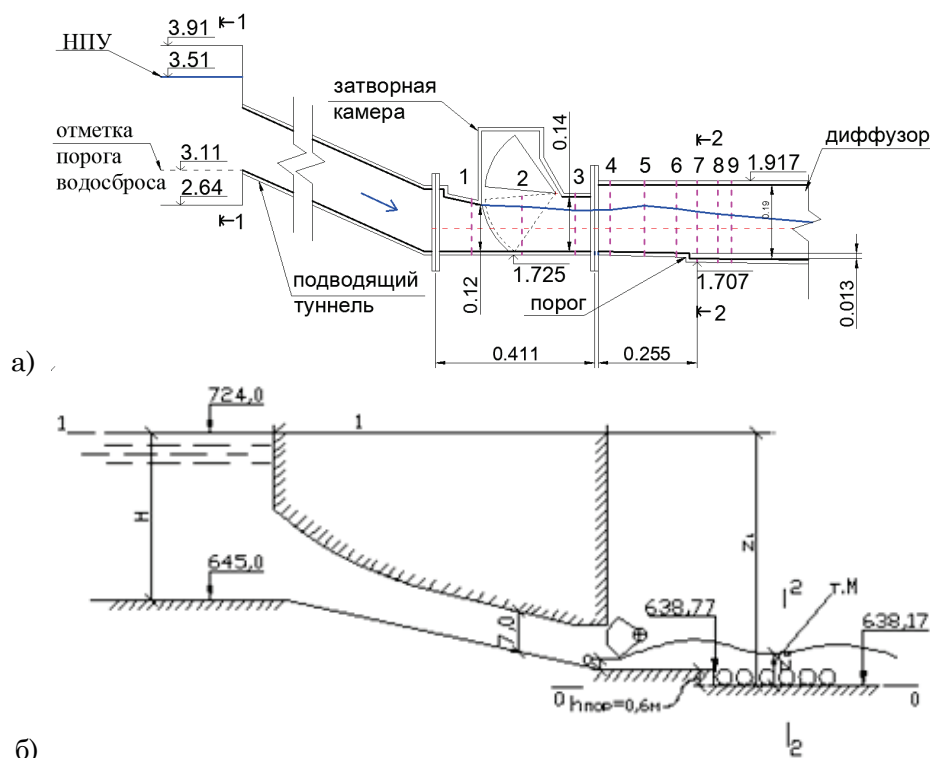


Рис. 2. Расчётная схема модели (а) и натурного сооружения (б):

⋮ – створы пьезометров на модели; 1 – номер створа пьезометров;

→ – направление движения воды.

Кавитация появляется при понижении в воде абсолютного давления $p_{абс}$ до давления парообразования $p_{кр}$, в результате чего растворённые газы формируются в пузырьки, а в дальнейшем происходит схлопывание этих пузырьков при повышении абсолютного давления в воде $p_{абс}$ до величины, превышающей давление парообразования.

Отсутствие возможности образования кавитации проверяется выполнением следующих условий:

1. Абсолютное давление в точке М $P_{абс(м)}$ должно быть больше критического давления парообразования $P_{кр}$, принимаемого равным давлению насыщенных паров чистой воды, которое зависит только от температуры воды (давлению, соответствующему испарению жидкости при данной температуре [8]), т.е.

$P_{абс(м)} > P_{кр} = P_t$, Па (P_t зависит от температуры воды и определяется по справочнику).

2. $P_{изб} < (P_{атм} - P_{кр}) = (P_{атм} - P_t)$, Па.

3. Параметр кавитации $K < K_{кр} = 1$.

При невыполнении хотя бы одного из трех условий возможно появление кавитации на изучаемом объекте.

Оценку возможности возникновения кавитации проводим общепринятым методом сопоставления фактических значений коэффициентов кавитации вблизи рассматриваемых элементов $K = \frac{P_{изб} - P_{кр}}{\rho * \frac{v_{хар}^2}{2}}$ с их кри-

тических величинами $K_{кр}$. При этом условие возникновения кавитации выражается неравенством $K < K_{кр}$ [2].

Результаты исследований. Проверим возможность появления кавитации и кавитационной эрозии в условиях полного открытия сегментного затвора и при прохождении максимального расчетного расхода $Q_H^{НПУ} = 1037 \text{ м}^3/\text{с}$ (для модели он составляет $Q_M = 0,05866 \text{ м}^3/\text{с}$). Расчет ведем для расчетного сечения 2-2 (соответствует створу пьезометров № 7). При этом принимаем, что

$$P_{а.б.с.} = P_{атм.} + \rho gh;$$

$$P_{изб} = \rho gh.$$

$$P_{изб} = \frac{1000 \text{ кг}}{\text{м}^3} * 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} * 0,0417 \text{ м} = 409,08 \text{ Па} -$$

согласно показаниям пьезометра, в створе № 7 в центре расчетного сечения (рис. 2).

$$P_{а.б.с.} = 101325 + 409,08 = 101734,08 \text{ Па.}$$

$$P_{кр} = P_{t=15^\circ\text{C}} = 1710 \text{ Па.}$$

$$P_{абс(м)} = 101734,08 \text{ Па} > P_{кр} = 1710 \text{ Па.}$$

Первое условие отсутствия кавитации выполнено. Проверим второе условие:

$$P_{изб} = 409,08 \text{ Па} < (P_{атм} - P_{кр}) = 99615 \text{ Па.}$$

Второе условие отсутствия кавитации выполнено.

Параметр кавитации:

$$K = \frac{P_{изб} - P_{кр}}{\rho * \frac{v_{хар}^2}{2}},$$

где $v_{хар}^2 = 3,95 \text{ м}^2/\text{с}^2$ – квадрат скорости, измеренной с помощью микровертушки на модели водосброса, тогда

$$K = \frac{409,08 - 1710}{1000 * \frac{15,6025}{2}} = -0,167 < K_{кр} = 1.$$

По итогам расчёта мы видим, что не все условия отсутствия кавитации были выполнены. Также в расчётном створе наблюдается сильное падение избыточного давления воды (рис. 3), и в водосбросе наблюдаются местные большие неровности (стыки от опалубки при бетонировании, выбоины, каверны и т.д.) – предполагается появления кавитации.

Согласно полученным расчетным данным при уровне воды в ВБ на отметке НПУ = 724 м через глубинный водосброс пойдёт расход $1037 \text{ м}^3/\text{с}$, а средние скорости воды в безнапорной части водосброса после затвора достигнут величины $\approx 30 \text{ м/с}$.

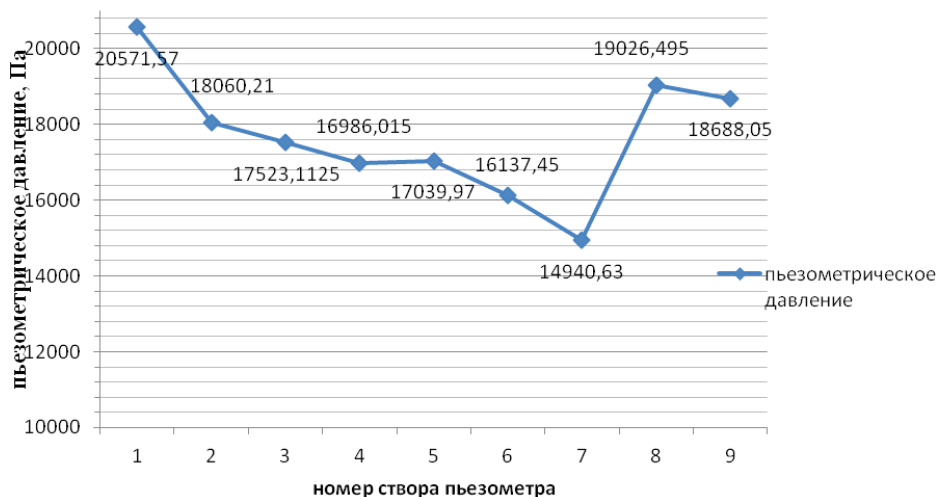


Рис. 3. График изменения давления по оси глубинного водосброса

Как отмечалось выше, при скоростях потока более 25 м/с для обеспечения нормальной работы водопропускного сооружения необходимо принимать особые меры по учету (воздействия кавитации на ста-

дии проектирования) кавитации, так как интенсивность кавитационной эрозии тел, обтекаемых высокоскоростным потоком, пропорционально зависит от скорости потока в 5-7 степени.

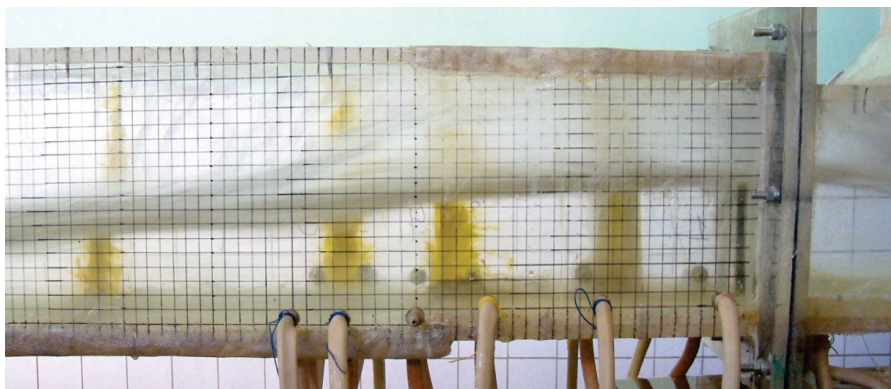


Рис. 4. Фотофиксация эксперимента

Выводы

Вероятность возникновения кавитации в тракте глубинного водосброса обеспечена не только недостатками выполнения работ и эксплуатацией водосброса с забитыми воздуховодами, но и существующими вопросами по принятым проектным решениям. Дальнейшее изучение и проведение опытов позволят уточнить предлагаемые методы решения вопроса.

Стоит отметить, что из-за столь маленького масштаба модели непосредственно моделировать кавитацию и аэрацию нельзя, но можно получить данные о гидравлических характеристиках потока, на анализе которых станет ясно поведение потока на натурном сооружении.

Результаты эксперимента совпадают с ситуаций на натурном объекте: в расчётном створе, где наблюдается сильное падение избыточного давления воды, на натурном объекте зафиксированы кавитационные каверны в боковых стенках и дне водосброса.

Библиографический список

1. Слисский С.М. Гидравлические расчёты высоконапорных гидротехнических сооружений. М.: Энергоатомиздат, 1986. 304 с.
2. Розанов Н.П. Вопросы проектирования водопропускных сооружений, работающих в условиях вакуума и при больших скоростях потока. М.–Л.: Гос. энергетическое изд-во, 1959. 208 с.
3. Рекомендации по учету кавитации при проектировании водосбросных гидротехнических сооружений. ПЗ8-75/ВНИИГ. Л.: ВНИИГ, 1976. 300 с.
4. Румянцев И.С., Зимнюков В.А., Зборовская М.И. Исследование водосбросных сооружений Курпсайской ГЭС: Отчёт о научно-исследовательской работе. М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2008. 48 с.

5. Румянцев И.С., Зимнюков В.А., Зборовская М.И. Исследование водосбросных сооружений Курпсайской ГЭС: Отчёт о научно-исследовательской работе. М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2012. 129 с.

6. Румянцев И.С., Зимнюков В.А., Зборовская М.И., Кавжарадзе Г.В. Улучшение работы глубинного водосброса Курпсайской ГЭС // Природообустройство. 2012. № 4. С. 33-38.

7. Лавров Н.П., Атаманова О.В. и др. Оценка состояния и разработка программы исследований водосбросных сооружений Токтогульской и Курпсайской ГЭС (итоговый). Кн. 2: Оценка состояния и разработка рекомендаций по реабилитации глубинного водосброса на Курпсайской ГЭС: Отчёт о научно-исследовательской работе. Бишкек, 2005. 44 с.

Материал поступил в редакцию 29.09.2016 г.

Сведения об авторах

Зимнюков Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидротехнические сооружения» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 127550, г. Москва, Большая Академическая ул., д. 44; тел.: 8 (499) 153 96 33; e-mail: moo_abh@mail.ru

Зборовская Марина Ильинична, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидротехнические сооружения» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 127550, г. Москва, Большая Академическая ул., д. 44; тел.: 8 (499) 153 96 33; e-mail: moo_abh@mail.ru

Зайцев Антон Иванович, аспирант кафедры «Гидротехнические сооружения» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 127550, г. Москва, Большая Академическая ул., д. 44; тел.: 8 (499) 153 96 33; e-mail: moo_abh@mail.ru

V.A. ZIMNYUKOV, M.I. ZBOROVSKAYA, A.I. ZAITSEV

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

INVESTIGATION OF THE SPILLWAY CULVERT OPERATION WITH A SEGMENT GATE

There is considered the operation of a high-pressure spillway culvert with a segment gate, available threshold and asymmetric diffuser outlet part at passing the maximum rated flow with determination of the possibility of cavitation origin. As an example there is analyzed a flood flow through the hydraulic unit. There are revealed the causes of cavitation origin in the spillway diversion channel with the determination of a high-speed mode and studying of piezometric pressures in the rated section lines on the basis of the data obtained at the spillway model operation of scale 1:50 M. The analysis of the obtained data shows that under the given operating conditions the cavitation will occur in the presence of any potential stimulating agent in the spillway non-pressure part at a rate of the discharged flow exceeding 400 m³/s. For eliminating the possibility of cavitation formation and ensuring an accident-free operation of the spillway it is necessary to change the outlet design (to smooth out turns, expansion of the diffuser part should be made smoother, to replace the materials by more cavitation resistant ones, to reduce roughness of the concrete surface by polishing/grinding) or change the characteristics of the water flow (to increase the degree of flow aeration, reduce the flow velocity). It is also recommended to reduce the flow water with an increase of the term of flood discharge and significant pre-flood emptying of the reservoir in high-water years.

Kurpsai hydraulic unit, spillway culvert, cavitation, modeling research, model of the spillway culvert, hydraulic investigations, flow velocity.

References

1. Slissky S.M. *Hydravlicheskie raschety vysokonapornyh hidrotehnicheskikh sooruzhenij*. M.: Energoatomizdat, 1986. 304 s.

2. Rozanov N.P. *Voprosy proektirovaniya vodopropusknyh sooruzhenij, rabotayushchih v usloviyah vakuuma i pri boljshih skorostyah potoka*. M. – L.: Gos. Energeticheskoe isdvo, 1959. 208 s.

3. *Recomendatsii po uchetu kavitatsii pri proektirovanii vodosbrosnyh hidrotehnicheskikh sooruzhenij*. P38-75/VNIIG. L.: VNIIG, 1976. 300 s.

4. Rummyantsev I.S., Zimnyukov V.A., Zborovskaya M.I. *Issledovanie vodosbrosnyh sooruzhenij Kurpsaiskoj GES: Otchet o nauchno-issledovateljskoj rabote*. M.: FGOU VPO MGUP, 2008. 48 s.

5. Rummyantsev I.S., Zimnyukov V.A., Zborovskaya M.I. *Issledovanie vodosbrosnyh sooruzhenij Kurpsaiskoj GES: Otchet o nauchno-issledovateljskoj rabote*. M.: FGOU VPO MGUP, 2012. 129 s.

6. Rummyantsev I.S., Zimnyukov V.A., Zborovskaya M.I. *Kavzharadze G.V. Uluchshenie raboty glubinnogo vodosbrosa Kurpsaiskoj GES // Prirodoobustrojstvo*. 2012. № 4. S. 33-38.

7. Lavrov N.P., Atamanova O.V. *And others. Otsenka sostoyaniya i razrabotka programmy issledovaniy vodosbrosnyh sooru-*

zhenij Toktoguljskoj i Kurpsaiskoj GES (itogovoj). Kn. 2: Otsenka sostoyaniya i razrabotka rekomendatsij po reabilitatsii glubinnogo vodosbrosa na Kurpsaiskoj GES: Otchet o nauchno-issledovateljskoj rabote. Bishkek, 2005. 44 s.

The material was received at the editorial office
29.09.2016

Information about the authors

Zimnyukov Vladimir Anatoljevich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair «Hydraulic engineering structures» FSBEI HE RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev, 127550, Moscow, Boljshaya Academicheskaya ul., d. 44; tel.: 8 (499) 153 96 33; e-mail: moo_abh@mail.ru

Zborovskaya Marina Iljinichna, candidate of technical sciences, associate professor of the chair «Hydraulic engineering structures» FSBEI HE RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev, 127550, Moscow, Boljshaya Academicheskaya ul., d. 44; tel.: 8 (499) 153 96 33; e-mail: moo_abh@mail.ru

Zaitsev Anton Ivanovich, post graduate student of the chair «Hydraulic engineering structures» FSBEI HE RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev, 127550, Moscow, Boljshaya Academicheskaya ul., d. 44; tel.: 8 (499) 153 96 33; e-mail: moo_abh@mail.ru