

reliability estimates taking into consideration the effect of disconnection of sections, reduction of pressure in the system at the calculated hour and hours of maximum water consumption, number of failures during the operation period. The obtained results can serve as a basis for optimization of both newly created and reconstructed PHS in order to ensure a given reliability of water supply.

Pressure hydraulic system, simulation modeling, factor analysis, reliability of water supply, optimization of pressure hydraulic system.

References

1. **Abramov N.N.** Nadezhnostj system vodosnabzheniya: (Nadezhnostj i kachestvo) – M.: Strojizdat, 1979. – 231 s.
2. **Explotatsiya system vodosnabzheniya, kanalizatsii i gazosnabzheniya: Spravochnik / V.D. Dmitriev, D.A. Korovin, A.I. Korablev I dr.** – L.: Stroyizdat. 1988-383; il.
3. **Karambirov S.N.** Matematicheskoe modelirovanie system podachi i raspredeleniya vody v usloviyah mnogorezhimnosti i neopredelennosti: Monografiya. – M.: MGUP, 2004-197s.
4. **Karambirov S.N., Manukyan D.A., Bekisheva L.B.** Otsenka nadezhnosti podachi vody sistemami vodosnabzheniya. // Doklady Rossijskoj Akademii seljskohozyajstvennyh nauk. – 2013. – № 6. – S. 63-65.
5. **Egilsky I. S** Avtomatizirovannye sistemy upravleniya tehnologicheskimi protsessami podachi i raspredeleniya vody. – L.: Stroyizdat, 1988. – 216 s. : ill.

The material was received at the editorial office
22.07.2017

Information about the authors

Fartukov Vasilij Alexandrovich, associate professor, candidate of technical sciences, Federal state budgetary educational institution of higher education “Russian state agrarian University-MAA named after C.A. Timiryazev”, Moscow, 125550, ul. Pryanishnikova, d. 19 tel.: 8(916)6531759; e-mail: vasfar@mail.ru

Burkova Yulia Gennadjevna, associate professor, candidate of technical sciences, Federal state budgetary educational institution of higher education “Russian state agrarian University-MAA named after C.A. Timiryazev”, Moscow, 125550, ul. Pryanishnikova, d. 19 tel.: 8(499)1539766; e-mail: burkova.msuee@mail.ru

Bekisheva Laura Borisovna, post graduate student, manager of JSC “Concern “Sea information system – Agat”, Moscow, 105275, Enthusiasts highway, 29 tel.: 8(917)5425746; e-mail: laura.lora@list.ru

УДК 502/504:627.8

DOI 10.26897/1997-6011/2018-1-18-24

В.А. ВОЛОСУХИН, Е.Н. БЕЛОКОНЕВ

Институт безопасности гидротехнических сооружений (ИБГТС), Ростовская область, г. Новочеркасск, Российская Федерация

М.А. ВОЛЫНОВ

Государственное бюджетное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова (ВНИИГиМ), г. Москва, Российская Федерация

ВОДОЗАБОРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ ГАЭС

Целью исследований являлось экспериментальное подтверждение того факта, что интенсивность воронкообразования в усовершенствованном варианте водоприемника и входного оголовка существенно ниже, чем в проектном и разработка рекомендаций по внесению изменений в проект. В статье изложены результаты физического моделирования водоприемника и входного – выходного оголовка верхнего бассейна (ВБ) второй очереди Загорской гидроаккумулирующей станции ЗаГАЭС-2. Исследовались проектный и реконструированный варианты водоприемника и оголовка. Реконструкция водоприемника и оголовка была предложена с целью сведения до минимума интенсивности воронкообразования в акватории сооружений по результатам выполненного ранее 2D и 3D моделирования движения водного потока. В новой конструкции верхний бассейн переходит в водоприемник с уклоном дна 1:7. Перед входным оголовком дно водоприемника запроектировано с нулевым уклоном. Входные отверстия имеют раструбное очертание с вертикальными стенками, достигающими верха входного оголовка. Бычки короче по длине,

но доведены до верха сооружения. Эллиптический обтекатель короче проектного и соединен с забральной балкой. Боковые откосы водоприемника примыкают к береговым устоям. Стабильное воронкообразование отмечается только при значительном снижении уровня воды в ВБ и только в пределах отверстия между бычками с гораздо меньшей интенсивностью вращения. Снижение интенсивности воронок позволяет уменьшить глубину погружения порога входных отверстий оголовка без увеличения опасности всасывания мусора и льда, т.е. добиться снижения объемов работ по строительству входного оголовка.

Гидроаккумулирующая электрическая станция, верхний бассейн, водозаборное сооружение, водоприемник, входной оголовок, воронкообразование, критическая глубина, надежность, безопасность, математическое и физическое моделирование, пропускная способность.

Введение. В энергетических системах со значительным удельным весом ТЭС и АЭС в структуре мощностей технологические ограничения, определяющие режим их работы, преодолеваются путем использования гидро – и гидроаккумулирующих электростанций (ГЭС и ГАЭС), доля которых в разных странах составляет от 10 до 30% от общей мощности. Загорская гидроаккумулирующая электростанция (ЗаГАЭС-1) на реке Кунья в Московской области, участвуя в автоматическом регулировании частоты и перетоков мощности, а также покрывая суточные пиковые нагрузки в Московской и Центральной энергосистемах, является важным структурным элементом энергосистемы Центра.

Первая очередь ЗаГАЭС-1 мощностью 1200 МВт была построена в 1980-2003 годах. С 2007 года велось строительство второй очереди ЗаГАЭС-2. В связи с инцидентом,

произошедшим 17 сентября 2013 г. на Загорской ГАЭС-2, связанным с неравномерной (непроектной) осадкой здания станции, ее строительство было остановлено [1, 2]. Проектная мощность ЗаГАЭС-2 составляет 840/1000 МВт (турбинный / насосный режимы), среднегодовая выработка – 1,1 млрд кВт ч.

К основным элементам ГАЭС относятся: верхний бассейн (ВБ), реверсивный водоприемник, входной – выходной оголовок ВБ, турбинные-напорные трубопроводы, здание ГАЭС, нижний бассейн (НБ), входной и выходной оголовки. ВБ ЗаГАЭС-2 (рис. 1) создается с помощью дамб общей длиной 3,38 км, средней высотой 13,5 м и максимальной высотой у входного оголовка 40,0 м. Полезный объем воды в ВБ при НПУ составляет 11,8 млн м³. Водоприемник ЗаГАЭС-2 по конструкции аналогичен водоприемнику ЗаГАЭС-1.

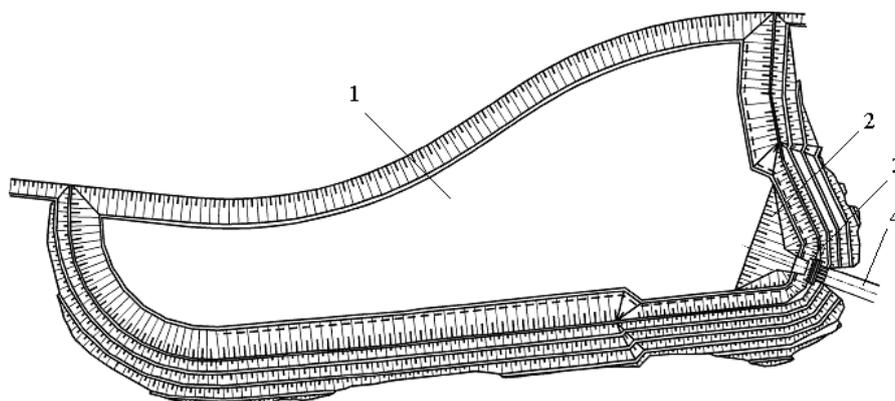


Рис. 1. План верхнего бассейна ЗаГАЭС-2:
 1 – верхний бассейн (ВБ); 2 – реверсивный водоприемник;
 3 – входной оголовок; 4 – трубопроводы

ГАЭС, работающие попеременно в генераторном и насосном режимах, относятся к особому виду сооружений, с постоянно изменяющимся уровнем воды в ВБ (до 30 циклов в сутки).

Опыт эксплуатации водозабора ЗаГАЭС –1 показал, что одним из недостатков его работы в турбинном режиме, с гидравличе-

ской точки зрения, является возникновение водоворотов – воронок всасывания. Водовороты уменьшают надежность сооружения, могут приводить к кавитационным явлениям во входном оголовке и турбинных трубопроводах. Воронки всасывания в водоприемнике ЗаГАЭС –1 могут достигать 15,0 м в диаметре и хаотично перемещаться в его

акватории, независимо от расположения работающих отверстий.

При снижении уровня воды в ВБ ниже критического значения между дном воронки и входным оголовком формируется воздушный жгут, который уменьшает пропускную способность оголовка и может проникать в трубопроводы и достигать гидротурбин. Кроме того, существует опасность засасывания в водоприемник шуги, льда, мусора и т.п. Водовороты перед водозаборными устройствами крайне нежелательны, и следует устранять условия, способствующие их возникновению. По данным [3] попадание 1% воздуха в турбину может снизить ее КПД на 15%. Значительный вклад в обобщение научных исследований в области воронкообразования внесли В.И. Поликовский, Р.Г. Перельман [4], П.Г. Киселев [5], Дж. Шарп [3].

Одной из основных причин возникновения в воде вихревого движения и формирования водоворотов и воронок на ее поверхности является неудачная геометрия водоприемника и место расположения водоприемных отверстий. ВБ ЗаГАЭС-2 (см. рис. 1) представляет собой емкость, запроектированную с учетом топографических условий, асимметрично по отношению к продольной оси основных сооружений – турбинных трубопроводов. Асимметрия приводит к тому, что водный поток подходит к водоприемнику со значительными поперечными составляющими скорости [6, 7, 8].

Ниже рассматривается вопрос уменьшения интенсивности образования водоворотных зон на основании гидравлических исследований проектной и усовершенствованной конструкций водоприемника ВБ Загорской ГАЭС-2, проведенных в гидротехнической лаборатории Новочеркасской государственной мелиоративной академии (НГМА). Целью исследований являлось экспериментальное подтверждение того факта, что интенсивность воронкообразования в усовершенствованном варианте водоприемника и входного оголовка существенно ниже, чем в проектной, а также разработка рекомендаций по внесению изменений в их проект. Для ее достижения были решены следующие задачи:

- проведение экспериментов по пропуску расчетных расходов при различных уровнях на физической модели проектного варианта водоприемника и входного оголовка;

- проведение экспериментов по пропуску расчетных расходов при различных

- уровневых режимах на физической модели усовершенствованного варианта водоприемника и входного оголовка;

- разработка рекомендаций по внесению изменений в проектную документацию водоприемника и входного оголовка.

Материал и методы. Как и ВБ, водоприемник (см рис. 1) имеет несимметрично сужающуюся к оголовку конфигурацию в плане. Его дно имеет три уклона с заложением от 1:10 до 1:7. Перед входным оголовком дно имеет нулевой уклон. Заложение боковых откосов водоприемника составляет 1:3,5. Разность отметок НПУ и порога входного оголовка и составляет 38,9 м.

Поступление воды во входной оголовок происходит через четыре отверстия переменного по высоте поперечного сечения, разделенных тремя бычками. Отверстия на входе имеют форму раструба. Они вынесены на 24 м от здания оголовка в акваторию водоприемника. Ширина бычков, разделяющих отверстия, в начале – 2,0 м, а в конце – 4,5 м. Сверху отверстия прикрыты эллиптическим козырьком для исключения образования сжатого сечения на входе. Перед шандорными затворами размеры отверстий равны 7,5х7,5 м. Общая ширина входного оголовка равна 48,0 м, длина – 63,15 м. На длине 15,50 м квадратное сечение отверстий переходит в круглое диаметром 7,5 м.

Поскольку течение жидкости со свободной поверхностью определяется силами тяжести, модели ГТС должны иметь масштабы, удовлетворяющие условию подобия по числу Фруда (F_r). Чтобы избежать масштабных эффектов, модель должна быть достаточно большой: обычно геометрический масштаб рекомендуется в пределах от 1/15 до 1/60. В наших исследованиях масштаб моделей был принят 1:50. Следуя рекомендации Дж. Шарпа [3], что для достижения геометрического подобия, как правило, необязательно выдерживать масштаб шероховатости, т.к. шероховатость в натуре обычно достаточно мала, поверхность модели была выполнена как можно более гладкой. На рисунке 2 представлено фото модели проектного варианта ЗаГАЭС-2.

Результаты и обсуждение. Подробно гидравлические исследования водоприемника и входного оголовка модели ЗаГАЭС-2 описаны в [6, 7, 8]. В процессе проведения опытов исследовались явления воронкообразования и измерялись продольные и поперечные осредненные скорости по ширине и глубине потока. Анализ ско-

ростной структуры потока позволил сделать следующие выводы.

- чем меньше глубина воды в водоприемнике, тем больше неравномерность распределения скоростей по глубине;

- во всех режимах поперечные осредненные скорости V_{II} превышают осредненные продольные V . Это объясняется неравномерностью распределения водного потока по поперечному сечению водоприемника, плановыми поверхностными горизонтальными вращениями потока и сходом воды с боковых откосов к продольной оси водоприемника. Именно это явление провоцирует в водоприемнике усиление водоворотной активности. Например, при расходе $944 \text{ м}^3/\text{с}$ диаметр водоворотов достигал 15 м в пересчете на натуру (рис. 2).

С целью уменьшения воронкообразования необходимо было исследовать новые конструктивные решения водоприемника и входного оголовка.

В новой (усовершенствованной) конструкции водоприемника и входного оголовка были предложены следующие изменения по сравнению с проектным вариантом:

- продлить бычки и береговые устои до верха сооружения (рис. 3, 4);

- соединить бычки и береговые устои забральной балкой;

- выполнить примыкание откосов водоприемника к береговым устоям;

- входные отверстия разместить между бычками в сооружении оголовка;

- эллиптический обтекатель разместить между бычками и соединить с забральной балкой.



Рис. 2. Воронкообразование в акватории проектного варианта водоприемника и входного оголовка ВВ (натурный расход $944 \text{ м}^3/\text{с}$)

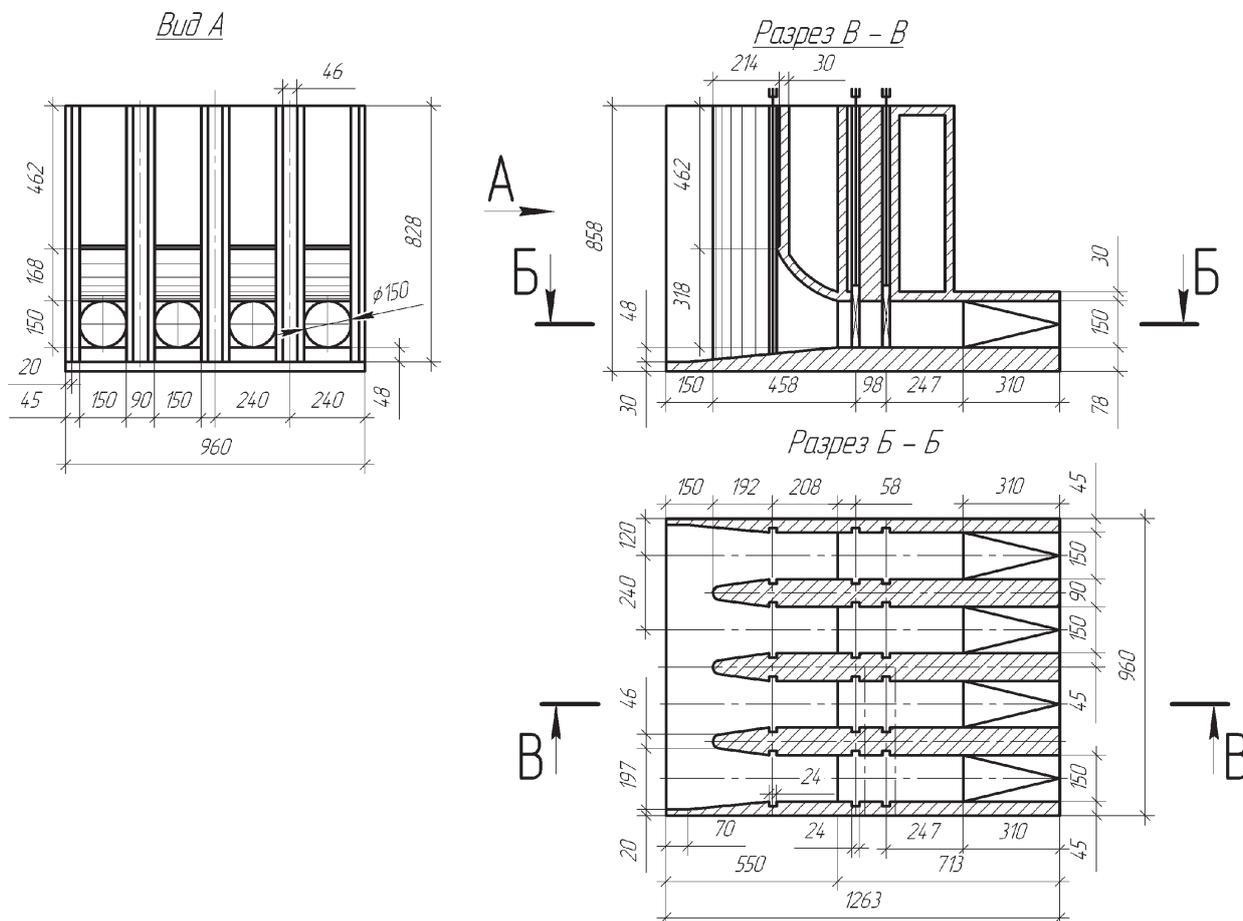


Рис. 3. Схема модели усовершенствованного входного оголовка



Рис. 4. Фотография модели водоприемника ГАЭС-2 после усовершенствования

В новой конструкции верхний бассейн переходит в водоприемник с уклоном дна 1:7. Перед входным оголовком дно водоприемника запроектировано с нулевым уклоном. Входные отверстия имеют раструбное очертание с вертикальными стенками, достигающими верха входного оголовка. Бычки короче по длине, но доведены до верха сооружения. Эллиптический обтекатель короче проектного и соединен с забральной балкой. Боковые откосы водоприемника примыкают к береговым устоям.

Выполненное моделирование показало, что благодаря нововведениям удалось значительно уменьшить поперечные составляющие осредненных скоростей на подходе к входному оголовку и существенно снизить воронкообразование и интенсивность вращения воронок.

В частности, установлено, что в отличие от проектной конструкции, где воронкообразование возникало во всех режимах и вальцы перемещались хаотично в акватории водоприемника, в новой конструкции водоприемника и входного оголовка отмечалось стабильное воронкообразование только при значительном снижении уровня воды в ВБ и только в пределах отверстия между бычками с гораздо меньшей интенсивностью вращения (рис. 5).

В пределах водоприемника (от верхнего бассейна до входного оголовка) воронкообразование отсутствует.

В случае установки сороудерживающих решеток перед забральными стенками ожидается резкое уменьшение интенсивность воронкообразования.

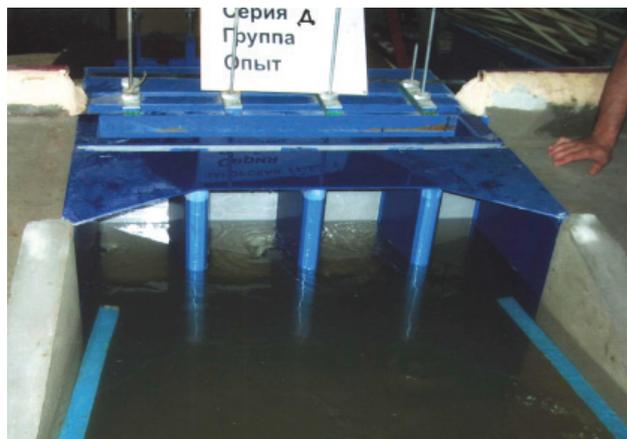


Рис. 5. Работа водоприемника и входного оголовка после реконструкции (натурный расход 944 м³/с). Поверхность потока спокойная

Выводы

1. В проектом варианте водоприемника и входного оголовка Загорской ГАЭС-2 отмечается значительное воронкообразование во всех режимах работы. Воронки всасывания хаотично перемещаются по акватории водоприемника.

2. Одной из основных причин воронкообразования является несимметричный подход воды к водоприемнику и входному оголовку, наличие переломов при сопряжении откосов водоприемника и оголовка, вынос входных отверстий от оголовка в акваторию водоприемника.

3. В новой конструкции верхний бассейн переходит в водоприемник с уклоном дна 1:7. Перед входным оголовком дно водоприемника запроектировано с нулевым уклоном. Входные отверстия имеют раструбное очертание с вертикальными стенками, достигающими верха входного оголовка. Бычки короче по длине, но доведены до верха сооружения. Эллиптический обтекатель короче проектного и соединен с забральной стенкой. Боковые откосы водоприемника примыкают к береговым устоям.

4. В предлагаемой конструкции водоприемника и входного оголовка отмечалось стабильное воронкообразование только при значительном снижении уровня воды в ВБ и только в пределах отверстия между бычками с гораздо меньшей интенсивностью вращения.

5. Новый (усовершенствованный) вариант входного оголовка можно рекомендовать к применению в проект.

6. Снижение интенсивности воронок позволяет уменьшить глубину погружения порога входных отверстий оголовка без увеличения опасности всасывания мусора и льда, т.е. добиться снижения объемов работ по строительству входного оголовка.

Библиографический список

1. Беллендир Е.Н., Александров А.В., Зерцалов М.Г. Защита и выравнивание зданий и сооружений с помощью технологии компенсационного нагнетания // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 2. – С. 15-19.

2. Александров А.В., Беллендир Е.Н., Лащенко С.Я. Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы. // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 7. – С. 2-10.

3. Шарп Дж. Гидравлическое моделирование. Перевод с англ. Л.А. Яскина; под ред. С.С. Григоряна. – М.: Мир, 1984. – 280 с.

4. Поликовский В.И., Перельман Р.Г. Воронкообразование в жидкости с открытой поверхностью. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 191 с.

5. Справочник по гидравлическим расчетам под ред. П.Г. Киселева. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.

6. Волосухин В.А., Белоконев Е.Н., Волынов М.А. Научное обоснование обеспечения надежности работы водозаборных сооружений: Монография. – Новочеркасск: Лик, 2008. – 162 с.

7. Гидравлические исследования водоприемника верхнего бассейна Загорской ГАЭС-2 с применением физического моделирования: отчет о НИР. Шифр 245 / рук. темы В.А. Волосухин, отв. исп. Е.Н. Белоконев; Новочерк. гос. мелиор. акад. – Новочеркасск, 2007 – 178 с.

8. Гидравлические исследования водоприемника верхнего бассейна Загорской ГАЭС-2: отчет о НИР / рук. темы Т.Г. Войнич-Сяноженцкий, В.А. Волосухин, М.А. Волынов, Н.М. Евстигнеев. – М.: ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова, 2007.

Материал поступил в редакцию 29.09.2017 г.

Сведения об авторах

Волосухин Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, директор Института безопасности гидротехнических сооружений, 346400, Россия, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Буденновская д.156, тел.: 8(928)2147511, e-mail: director@ibgts.ru, ngma_str_meh@mail.ru

Белоконев Евгений Никитович, кандидат технических наук, профессор, Заслуженный мелиоратор РФ, старший научный сотрудник Института безопасности гидротехнических сооружений; 346400, Россия, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Буденновская д.156, тел.: (8635)266026, e-mail: mail@ibgts.ru

Волынов Михаил Анатольевич, доктор технических наук, доцент, начальник отдела безопасности ГТС ГНУ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова.

V.A. VOLOSUKHIN, YE.N. BELOKONEV

Institute of Hydraulic Structures Safety, Rostov region, Novocherkassk, Russian Federation

M.A. VOLYNOV

State budget scientific institution All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Melioration named after A.N. Kostyakov, Moscow, Russian Federation

DIVERSIONS OF HYDROELECTRIC PUMPED-STORAGE PLANTS

The purpose of the investigations was an experimental confirmation of the fact that intensity of funnel formation in the improved version of conduit intake and head wall is significantly lower than in the project as well as development of recommendations for making changes in the design. In the article there are given results of physical modeling of conduit intake and input / output head wall of the upper basin (UB) of the second stage of Zagorskaya pumped-storage station ZaGAES-2. Design and reconstructed versions of the conduit intake water and head are investigated. Reconstruction of the conduit intake and head well was proposed in order minimize the intensity of funnel formation in the structures water area based on 2D and 3D modeling of the water flow movement having been performed earlier. In the new design the upper reservoir passes into conduit intake with a bottom incline of 1: 7. The conduit intake bottom in front of the head wall is designed with a zero inclination. Inlets have a splayed outline with vertical walls reaching the top of the entrance head. Piers are shorter in length but reach the top

of the structure. The elliptical fairing is shorter than in the project and is connected to the boom. The lateral slopes of the water intake join Oabutment piers. Stable funneling is observed only when the water level in the upper reservoir is significantly reduced in UB and only within the opening between the piers with a much lower intensity of rotation. Reduction of funnels intensity makes it possible to reduce immersion depth of the head wall holes without increasing the risk of debris and ice absorption that is reduce volumes of work on construction of the head wall.

Hydroelectric pumped-storage plant, upper reservoir, diversion, conduit intake, head wall, funneling, critical depth, reliability, safety, mathematical and physical simulation, flow capacity.

Reference list

1. **Bellendir E.N., Aleksandrov A.V., Zertsalov M.G.** Zashchita i vyравnivanje zdaniy i sooruzhenij s pomoshchjyu tehnologii kompensatsionnogo nagnetaniya // Gidrotehnikeskoe stroiteljstvo. – 2016. – № 2. – S. 15-19.

2. **Aleksandrov A.V., Bellendir E.N., Lashchenko S.Ya.** Likvidatsiya posledstvij osadki zdaniya stantsionnogo uzla Zagorskoj GAES-2 i vosstanoviteljnye raboty. // Gidrotehnikeskoe stroiteljstvo. – 2016. – № 7. – S. 2-10.

3. **Sharp Dzh.** Gidravlicheskoje modelirovanie. Perevod s angl. L.A. Yaskina; pod red. S.S. Grigoryana. – M.: Mir, 1984. – 280 s.

4. **Polikovskiy V.I., Pereljman R.G.** Voronkoobrazovanie v zhidkosti s otkrytoj poverhnostyu. – M.–L.: Gosenergoizdat, 1959. – 191 s.

5. Spravochnik po gidravlicheskim raschetam pod. red. P.G. Kiseleva. – 4-e izd. pererab. i dop. izd. – M.: Energiya, 1972. – 312 s.

6. **Volosukhin V.A., Belokonev E.N., Volynov M.A.** Nauchnoe obosnovanie obespecheniya nadezhnosti raboty vodozabornyh sooruzhenij: Monografiya. – Novoherkassk: Lik, 2008. – 162 s.

7. Gidravlicheskie issledovaniya vodorpriemnika verhnego bassejna Zagorskoj GAES –2 s primeneniem fizicheskogo modelirovaniya: otchet o NIR. Shifr 245 / ruk. temy V.A. Volosukhin, otv. isp. E.N. Belokonev; Novoherk. gos. melior. akad. – Novoherkassk, 2007-178 s.

8. Gidravlicheskie issledovaniya vodorpriemnika verhnego bassejna Zagorskoj GAES-2: otchet o NIR / ruk. temy T.G. Voinich-Syanozhentskij, V.A. Volosukhin, M.A. Volynov, H.M. Evstigneev. – M.: VNIIGiM im. A.N. Kostyakova, 2007.

Material was received at the editorial office
29.09.2017

Information about the authors

Volosukhin Victor Alekseevich, doctor of technical sciences, professor, honored scientist of RF, director of the Institute of Hydraulic Structures Safety, 346400, Russia, Rostov region, Novoherkassk, ul. Budennovskaya, 156, tel.: 8(928)2147511, e-mail: director@ibgts.ru, ngma_str_meh@mail.ru Rostov region,

Belokonev Yevgenij Nikitovich, candidate of technical sciences, professor, honored land reclamation expert of RF, senior researcher of the Institute of Hydraulic Structures Safety, 346400, Russia, Rostov region, Novoherkassk, ul. Budennovskaya, 156, tel.: 8(8635)266026, e-mail: mail@ibgts.ru

Volynov M.A. doctor of technical sciences, associate professor, head of the safety department of State budget scientific institution All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Melioration named after A.N. Kostyakov, Moscow, Russian Federation