

УДК 502/504:627.8

И. С. РУМЯНЦЕВ, В. А. ЗИМНЮКОВ, М. И. ЗБОРОВСКАЯ, Г. В. КАВЖАРАДЗЕ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный университет природообустройства»

УЛУЧШЕНИЕ РАБОТЫ ГЛУБИННОГО ВОДОСБРОСА КУРПСАЙСКОЙ ГЭС

Изменение режима заполнения водохранилищ Нарынского каскада, связанное с природно-климатическими условиями, изменением энергопотребления и режима эксплуатации Токтогульского каскада, вызвало изменение режима работы глубинного водосброса Курпсайской ГЭС. Оказалось, что фактическая пропускная способность глубинного водосбросного сооружения по различным причинам не соответствует проектным расходам воды. Появились кавитационные разрушения стенок отводящего тракта глубинного водосброса Курпсайской ГЭС. Проведены исследования по установлению гидравлических режимов, которые формируются при работе водосброса в его отводящем тракте за затворной камерой. Предложены меры для предотвращения разрушения отводящего тракта.

Курпсайский гидроузел (КГЭС), глубинный водосброс Курпсайского гидроузла (ГВС КГЭС), кавитация, аэрация, модель глубинного водосброса, гидравлические исследования, гидравлический режим, пропускная способность, скоростной режим, отводящий тракт, стальная облицовка, геомембрана, алмазная резка.

The regime change of water reservoirs filling of the Narynsk cascade connected with the natural-climatic conditions and mostly with changing of power consumption and operational regime of the Toktogul'sk cascade resulted in the operational regime change of the deep-water spillway of the Kurpsaisk HPS. It turned out that the actual capacity of the deep water spillway structure by different reasons did not correspond to the designed water consumptions. There appeared cavitation destructions of the diverting track walls of the deep water spillway of the Kurpsaisk HPS. Investigations were carried out on setting up hydraulic regimes which were formed under the spillway operation in its diverting track behind the gate chamber. There are proposed measures for breakage prevention of the diverting track.

Kurpsaisk hydraulic waterworks, deep water spillway of the Kurpsaisk hydraulic waterworks, cavitation, aeration, model of the deep water spillway, hydraulic investigations, hydraulic regime, capacity, speed regime, diversion track, steel lining, geomembrane, diamond cutting.

Изменение водно-энергетического баланса на каскаде Нарынских ГЭС за последние годы, связанное с природно-климатическими условиями, с изменением энергопотребления и режима эксплуатации Токтогульского каскада, вызвало интенсивное аккумулятивное стока в Токтогульском и Курпсайском водохранилищах. Впервые за весь период эксплуатации наблюдалось заполнение этих водохранилищ и производился сброс излишков воды не

только через поверхностный водосброс Токтогульской плотины, но и через поверхностный и глубинный водосбросы Курпсайской плотины.

Курпсайская ГЭС, расположенная на реке Нарын в Таласской области (раньше Ошская область) Кыргызской Республики, является второй ступенью каскада Нижненарынских ГЭС. Курпсайская ГЭС работает на попусках из водохранилища Токтогульской ГЭС (полезной емкостью 14 км³), расположенной на 40 км выше

по течению и обеспечивающей многолетнее регулирование стока реки Нарын.

В состав основных гидротехнических сооружений Курпсайского гидроузла входят:

бетонная гравитационная плотина наибольшей высотой 113 м с отметкой по гребню 728,0 м и длиной 364 м. Напор H на плотину при НПУ равен 109 м. Грунт основания – скала;

здание станции руслового (приплотинного) типа с однорядным расположением четырех агрегатов мощностью 206 МВт каждый. Надводная часть здания – каркасного типа с основными размерами: длина – 115,5 м, ширина – 25,0 м и высота – 23,0 м. Водоприемник с турбинными водоводами;

поверхностный водосброс, расположенный на правом берегу реки Нарын, с входным оголовком в теле плотины. Максимальный напор на входном блоке водосброса – 14 м при НПУ. Оголовок представляет собой однопролетный водослив

с широким порогом. Отметка порога водослива – 710,0 м. Ширина лотка водослива – 16 м, с постепенным сужением в плане к отводящему туннелю до 10 м. Отводящий тракт – наклонный, туннельно-корытообразного профиля. Концевая конструкция – расширяющийся в плане открытый лоток с устройством уступов – трамплинов;

глубинный водосброс, расположенный в правобережной части плотины, примыкает слева отводящим трактом непосредственно к торцу здания ГЭС. Глубинный водосброс состоит из входного оголовка с отметкой порога 645,0 м, трубы прямоугольного сечения 5х7 м длиной 52 м в пределах плотины, камеры затворов и открытого отводящего тракта с бетонным трамплином-виражом.

Проектная пропускная способность водосбросных сооружений Курпсайского гидроузла с учетом регулирования в водохранилище представлена в табл. 1.

Таблица 1

Вид сооружения	Пропускная способность, м ³ /с	
	При НПУ 724 м	При ФПУ 725 м (0,01 % обеспеченности)
Поверхностный водосброс	1500	1680
Глубинный водосброс	1037	1042
Турбины ГЭС	970	972
Итого	3507	3694

Глубинный водосброс состоит из входного оголовка с ремонтным затвором, напорного подводящего участка, затворной

камеры, безнапорного отводящего участка и концевого участка с боковым (лево-сторонним) сливом-трамплином (рис. 1).

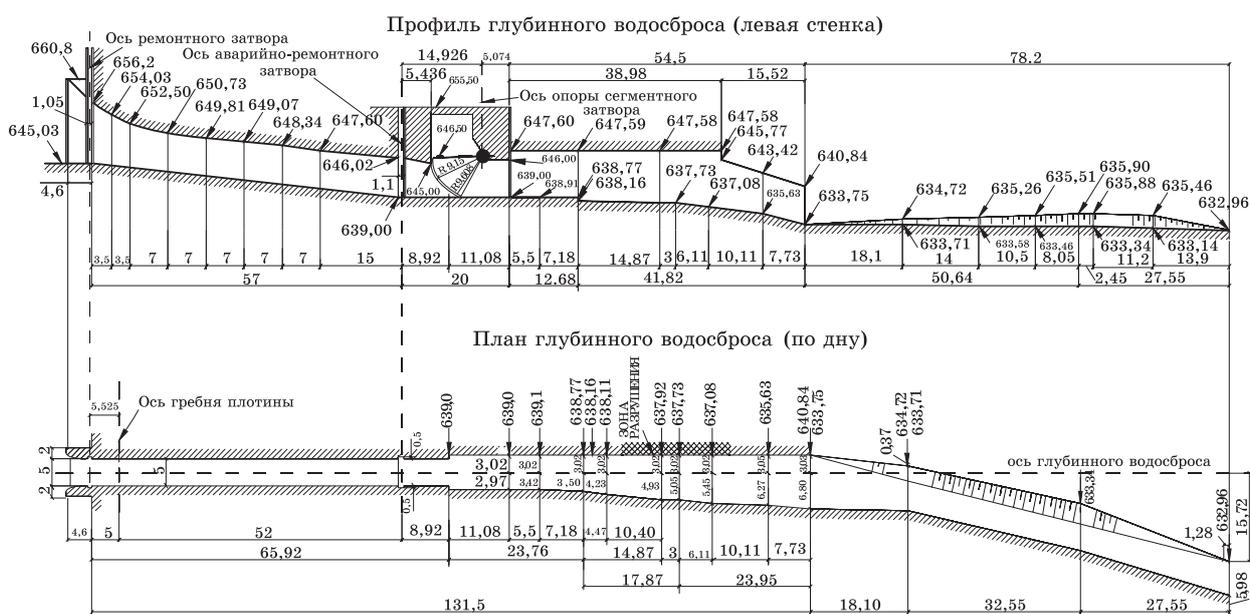


Рис. 1. Профиль и план глубинного водосброса (размеры и высотные отметки даны в метрах для натурального сооружения)

Подводящий участок прямоугольного сечения 5×7 м работает в напорном режиме, а отводящий участок переменного сечения работает в безнапорном режиме. Определяющим пропускную способность водосброса является выходное сечение на-

порного тракта (перед сегментным затвором) размером 5×6 м при полностью поднятом затворе. При частично открытом затворе размер выходного сечения ω будет равен $5 \times 5a$, где a – высота поднятия затвора, м (табл. 2).

Таблица 2

Основные характеристики расчета пропускной способности глубинного водосброса

Относительная высота n	a , м	ω , м ²	Коэффициент расхода μ	Коэффициент сжатия ϵ	Высота сжатия потока h_c , м	H , м	Q , м ³ /с	Напорный участок		Безнапорный участок	
								v , м/с	Re	v , м/с	Re
0,1	0,6	3	0,120	0,749	0,45	84,55	14,7	0,4	$1,87 \cdot 10^6$	4,9	$3,99 \cdot 10^6$
0,4	2,4	12	0,457	0,695	1,67	83,33	221,7	6,3	$2,82 \cdot 10^7$	18,5	$4,57 \cdot 10^7$
0,6	3,6	18	0,690	0,697	2,51	82,49	499,7	14,3	$6,36 \cdot 10^7$	27,8	$8,88 \cdot 10^7$
1,0	6,0	30	0,875	0,972	5,83	79,17	1035	29,6	$1,32 \cdot 10^8$	34,5	$1,44 \cdot 10^8$

Данные производственных материалов и проведенных натуральных наблюдений свидетельствует о том, что фактическая пропускная способность глубинного водосбросного сооружения по различным причинам не соответствует проектным расходам воды (см. рис. 1).

Для выяснения причин кавитационных разрушений стенок отводящего тракта глубинного водосброса Курпсайской ГЭС (ГВС КГЭС) необходимо установить гидравлические режимы, которые формируются при работе водосброса в его отводящем тракте за затворной камерой, и разработать меры для предотвращения разрушения отводящего тракта.

Анализ информации, полученной по результатам проведения обследований поверхности и гидромеханического оборудования ГВС КГЭС, позволил сделать выводы о том, что кавитационные разрушения в отводящем тракте глубинного водосброса не вызваны неисправностями в гидромеханическом оборудовании, так как оно находилось в рабочем состоянии, и отказов в работе отмечено не было. Разрушительной кавитации на участке водосброса, облицованного сталью, не было. За неровностями и дефектами бетонной поверхности отводящего тракта возможно появление локальных кавитационных зон, но при соответствующей обработке бетонной поверхности появления этих зон можно избежать.

Состояние 12-аэрационных труб (по 6 на каждой стороне водовода), расположенных в стенах отводящего лотка за порогом после затворной камеры, соответствует 6 свободным, не засоренным

трубам, что в два раза меньше проектного количества. Распределение их работы по стенкам следующее: на левой стенке – как два свободных, а на правой стенке – как четыре свободных воздуховода. Возможно, это одна из причин того, что на левой стенке кавитационная каверна больше, чем на правой стенке. Пропускной способности оставшихся не заглушенных воздухопроводов явно недостаточно для срыва вакуума в отводящем тракте за затворной камерой, а это способствует появлению там кавитации.

Неоднократное образование на протяжении нескольких лет крупных кавитационных каверн на правой и левой стенках отводящего тракта ниже порога в одних и тех же местах свидетельствует о том, что причина появления кавитационной коррозии носит систематический характер.

Пропускная способность ГВС определяется известными из гидравлики методами в зависимости от режима их работы [1–6]. Согласно [7], кавитацию необходимо учитывать при скоростях потока более 15 м/с. При напорах более 40...50 м, которым соответствуют скорости потока более 25 м/с, обеспечение нормальной работы водопропускных сооружений требует принятия особых мер.

После Второй мировой войны широкое распространение получили геомембраны с низкой проницаемостью (менее 10...12 м/с). Геомембраны уже более полувека успешно применяются на плотинах и водохранилищах, в каналах и туннелях. Они долговечны, позволяют бороться с потерями воды и защищают сооружения

от разрушения. По данным комиссии по большим плотинам, на сегодняшний день в мире насчитываются более 250 плотин с водонепроницаемыми геомембранами.

Открытая геомембрана, которая не уменьшает сечения туннеля и может повысить скорость водяного потока и пропускную способность туннеля, значительно упрощает контроль за работой и снижает предстоящие эксплуатационные расходы. Особенно популярна натяжная система (рис. 2). Открытая геомембранная конструкция уменьшает объем строительных материалов, которые необходимо доставлять по туннелю, объем подготовительных работ по сравнению со стальной облицовкой и значительно сокращает сроки монтажа.



а



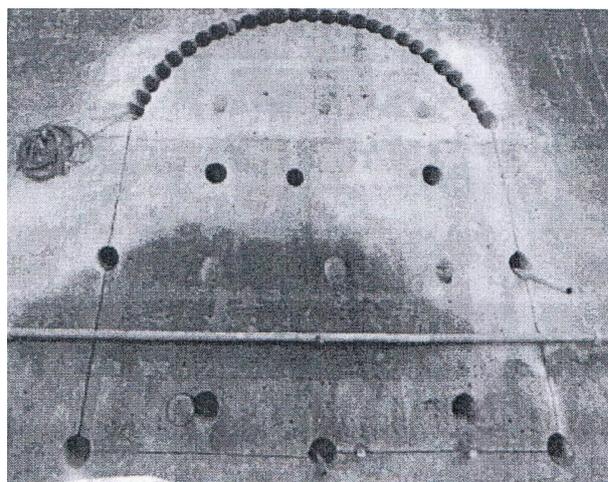
б

Рис. 2. Туннели с применением геомембранной конструкции облицовки: а – напорный туннель; б – безнапорный туннель

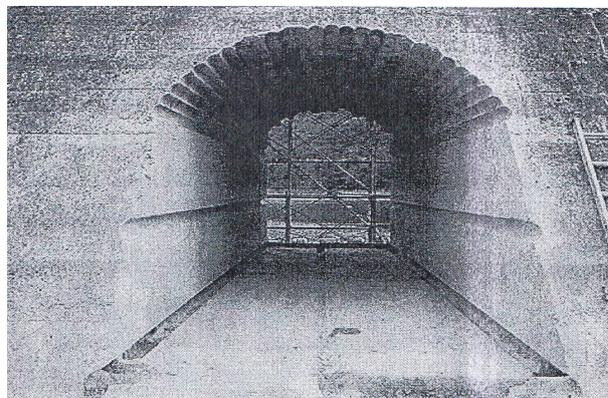
В последнее десятилетие все более широкое распространение на российских строительных объектах получает метод алмазной резки и сверления, позволяющий с большой точностью и без динамических нагрузок выполнять работы по разрушению и обработке бетона [8]. Новизна метода за-

ключается в применении алмазного инструмента в качестве рабочего органа стенорезной машины, которая не создает ударных нагрузок при воздействии на конструкции и не оставляет после себя макро- и микротрещин. И еще один позитивный фактор – экологическая чистота алмазного метода.

В 2002 году был сооружен второй горизонтальный тоннельный водосброс (высота $\cong 3,7$ м, ширина $\cong 4,0$ м) в теле бетонной гравитационной плотины Yuzuru dam (Япония) с применением алмазного сверления и резки (рис. 3а, б).



а



б

Рис. 3. Горизонтальный водосброс: а – формирование контура водосброса; б – готовый тоннельный водосброс

Очень важным является и то, что при алмазной резке железобетона нет необходимости дальнейшей обработки получающейся бетонной поверхности – шероховатость стенки минимальная. Кроме того, существует специальное алмазное оборудование, позволяющее шлифовать и полировать бетонные поверхности.

Высокая компактность и мобильность оборудования дает возможность проведения

работ в ограниченном пространстве. С применением алмазного инструмента возможно восстановление забитых воздуховодов ГВС КГЭС, что может существенно улучшить работу ГВС.

Также представляет определенный интерес применение полимерных покрытий и облицовок для защиты бетона водосбросных сооружений от воздействия высокоскоростного потока и кавитационной эрозии. Разработаны мастичные, полимеррастворные, полимербетонные составы как для применения в качестве защитных облицовок, так и для ремонта бетона. Усовершенствованные составы успешно применяются на Нурекской, Чарвакской ГЭС и ряде других гидросооружений [9].

Основные характеристики по результатам расчета пропускной способности глубинного водосброса Курпсайской ГЭС представлены в табл. 2 (см. табл. 2).

Согласно полученным расчетным данным, при открытии сегментного затвора на высоту 3,6 м и уровне воды в ВБ на отметке НПУ 724 м, через глубинный водосброс пойдет расход Q порядка 499,7 м³/с, а скорость воды в безнапорной части водосброса после затвора достигнет величины 27,8 м/с. Как отмечалось выше, при ско-

рости потока более 25 м/с для обеспечения нормальной работы водопропускного сооружения необходимо принимать особые меры по учету кавитации.

Согласно [10], при длине туннеля за затвором $l > 10h = 75$ м (где $h \cong 7,5$ м – высота туннеля) требуется устройство аэрационного канала (шахты). Величина $l = 75$ м незначительно превосходит величину горизонтальной проекции отводящего туннеля водосброса, которая составляет 65,58 м.

Кроме того, согласно [11], истечение воды через глубинные отверстия происходит с большими скоростями. И в этих условиях всякое резкое изменение формы отверстия затвором и стенками водовода, по которому движется вода, вызывает резкие изменения давления в потоке, вибрации затвора, образование сильных завихрений и значительных вакуумов, которые могут достигать предела кавитации. Для борьбы с образованием вакуума необходимо осуществлять подвод воздуха за глубинный затвор и стараться обеспечивать за ним безнапорный режим движения воды.

Скорость $v_{пор}$ для бетонов различных марок при различном содержании воздуха в потоке в области кавитации приведена в табл. 3.

Таблица 3

Пороговые скорости для бетонов при различном воздухосодержании

Воздухосодержание, %	Пороговая скорость, м/с			
	Марка бетона			
	160	300	400	500
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	–

В потоке жидкости, кроме элементарных вихрей, создающих его турбулентную структуру, развиваются дополнительные циркуляционные перемещения масс жидкости, не совпадающие по направлению с продольным их движением. Эти дополнительные внутренние течения и придают потоку

особую гидравлическую структуру, усложняющую решение многих задач инженерной гидравлики.

Модель ГВС КГЭС исследовалась без учета влияния нижнего бьефа, так как осуществлялся свободный отброс струи после безнапорного участка туннеля (рис. 4).



Рис. 4. Склейка фотографий эксперимента, проведенного 5 июля 2011 года

Гидравлические режимы работы водосброса исследовали на модели при разных частичных открытиях сегментного затвора в диапазоне расходов на натуре $Q_n = 300...600 \text{ м}^3/\text{с}$ и уровне верхнего бьефа НПУ = 724 м, $Q_m = 17...34 \text{ л/с}$. В рассматриваемом водосбросном сооружении после конфузора происходит резкое сужение потока под затвором, с падением давления при скоростях более 25 м/с и развитием кавитации (см. рис. 1, участок перед секторным затвором). Одной из причин местного падения давления является неровность на твердой стенке водовода – это уступ (выступ) по потоку (см. рис. 1), резкий изгиб влево левой стенки водосброса в сторону направления течения – излом, шероховатая поверхность.

Выводы

Согласно [4], самой надежной и действенной мерой борьбы с кавитационной эрозией является задание таких форм, размеров элементов и таких гидравлических режимов, при которых исключается появление кавитации:

придание элементам сооружения очертаний, которые позволяют использовать особенности суперкавитации – следует обеспечить срыв кавитационного факела с поверхности конструкции без замыкания его на расположенных ниже по течению твердых границах;

выравнивание неровностей поверхностей водопропускных трактов;

применение бетона с повышенной кавитационной стойкостью или специальных кавитационных покрытий – облицовок (стальных, полимерных и пр.);

подвод воздуха или воды в область вакуума.

Согласно табл. 3, каждый материал при скорости, меньшей некоторой предельной (пороговой $v_{пор}$) скорости, сопротивляется действию кавитации весьма долго. Разрушительное действие кавитации становится существенным (развитая стадия кавитации) при $v > v_{пор}$.

1. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: справ. пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 624 с.

2. Гинзбург Ц. Г., Иноземцев Ю. П.,

Картелев Б. Г. Кавитационная износостойкость гидротехнического бетона. – Л.: Энергия, 1972. – 214 с.

3. Новикова И. С. Кавитация при обтекании одиночного выступа на поверхности водосброса: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1986.

4. Слиссский С. М. Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений; 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 304 с.

5. Чугаев Р. Р. Гидравлика. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.

6. Штеренлихт Д. В. Гидравлика. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.

7. Плотины бетонные и железобетонные: СНиП 2.06.06–85. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 40 с.

8. Зерцалов М. Г., Косолапов А. В. Использование технологии алмазной резки и сверления бетона и железобетона в гидротехническом строительстве // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 4. – С. 19–24.

9. Петров Г. Д., Язев Р. Е. Технология применения кавитационных эпоксидных покрытий бетона гидросооружений // Гидротехническое строительство. – 1974. – № 2. – С. 19–24.

10. Исследования водосбросных сооружений Курпсайской ГЭС: отчет о научно-исследовательской работе / И. С. Румянцев [и др.] – М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2008. – 48 с.

11. Гидротехнические сооружения: учебник для вузов / Л. Н. Рассказов [и др.] – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 528 с.

Материал поступил в редакцию 25.05.12.

Румянцев Игорь Семенович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Гидротехнические сооружения»
Тел. 8 (499) 976-24-60

Зимнюков Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент
Тел. 8 (499) 976-24-60

Зборовская Марина Ильинична, кандидат технических наук, доцент
Тел. 8 (499) 153-96-33

E-mail: too_abh@mail.ru

Кавжарадзе Георгий Владимирович, аспирант