

Гидравлические натурные испытания эксплуатационного водосброса Бурейского гидроузла при открытии затворов на 1,5 м

Петров О. А.¹, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник
(АО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”),

Попов А. В.², инженер, Директор филиала ПАО “РусГидро” — “Бурейская ГЭС”
(Филиал ПАО “РусГидро” — “Бурейская ГЭС”)

В статье даны результаты гидравлических натурных испытаний эксплуатационного водосброса Бурейского гидроузла, которые проведены в 2021 г. при новых открытиях основных затворов на 1,5 м. При проведении испытаний оценивались геометрические параметры потока на низовой грани плотины, условия его аэрации, брызгообразование, вибрации затвора, а также гидравлический режим течений в нижнем бьефе гидроузла.

Ключевые слова: натурные испытания, эксплуатационный водосброс, геометрические параметры потока, аэрация, вибрации, Бурейская ГЭС.

Hydraulic tests of the operational spillway of the Bureisk HPP

Petrov O. A.¹, Candidate of Technical Sciences, senior researcher
(JSC “VNIIG n.a. B. E. Vedeneev”),

Popov A. V.², engineer, Director PAO “RusHydro”'s brunch
PAO “RusHydro” — “Bureisk HPP”

In the presentation shows the results hydraulic tests of the operation spillway Bureisk HPP in which were conducted in 2021 with new openings of the gates at 1.5 m. During the tests the geometrical parameters of the flow at the downstream face of the dam, conditions of its aeration, splash formation, gate vibration, as well as the hydraulic regime of flows in the downstream.

Keywords: hydraulic test, operation spillway, flow geometrics, aeration, vibrations, Bureisk HPP.

В 2021 г. завершилась комплексная модернизация всех восьми основных плоских затворов эксплуатационного водосброса Бурейской ГЭС, включающая монтаж новых верхних звеньев штанг для обеспечения промежуточного положения их открытия на 1,5 м. В связи с модернизацией затворов была поставлена задача провести натурные гидравлические испытания при различных режимах работы водосброса с открытием затворов на новую величину, которые состоялись в конце этого же года. До выполнения модернизации на затворах были предусмотрены подхваты для их подъема на 3,0 м, 6,0 м и 8,7 м, а открытие на 1,5 м проектом предусмотрено не было.

Основная цель модернизации верхних звеньев штанг состояла в возможности подъема уровней воды в водохранилище и аккумуляции части объема паводка при минимизации сбросных расходов в нижний бьеф гидроузла. Результаты испытаний позволили также скорректировать и дополнить регламент маневрирования затворами водосбросной плотины с учетом новых открытий и обеспечить безопасный режим работы Бурейского гидроузла.

Испытания, проведенные в октябре 2021 года, позволили оценить геометрические параметры сбросного потока, брызгообразование, аэрацию и вибрации затворов.

В состав основных гидротехнических сооружений Бурейского гидроузла на реке Бурейя входят бетонная гравитационная плотина максимальной высотой 140 м, длиной по гребню 789 м и приплотинная ГЭС длиной 187 м, имеющая 6 гидроагрегатов с установленной мощностью 2010 МВт.

Часть фронта бетонной плотины занимает поверхностный водосброс, имеющий 8 пролётов шириной по 12 м каждый, разделённый на оголовке быками, толщиной по 3 м. На низовой грани плотины предусмотрены отдельные стены, отделяющие сбросной поток за 4-мя центральными пролётами 3 – 6 от потока за пролётами 1 – 2 и 7 – 8 (рис. 1).

Отметим, что предшествующие натурные испытания эксплуатационного водосброса, целью которых являлась необходимость убедиться в соответствии данного сооружения проектным требованиям по условиям его работы, в том числе по способности противостоять воздействию высокоскоростного потока, были проведены в 2008, 2009 и 2016 гг., результаты которых приведены в [1]. Натурные испытания эксплуатационного водосброса прошли с 5 по 6 октября 2021 года при отм. УВБ = 255,35 м.

¹ PetrovOA@vniig.ru

² PopovAV@rushiydro.ru



Рис. 1. Общий вид с нижнего бьефа на водосбросную плотину Бурейского гидроузла: 1 — правобережная часть с пролётами № 1 – 2; 2 — центральная часть с пролётами № 3 – 6; левобережная часть с пролётами № 7 – 8; 4, 5 — трамплины-виражи; 6 — цилиндрический трамплин с углом схода 37°; 7 — уступы-азараторы на отм. 237,60 м и 228,80 м; 8, 9 — разделительные и ограждающие стены

Максимальный расход через водосброс составил 1400 м³/с, который был зафиксирован при открытии всех восьми затворов на 1,5 м.

Результаты натурных испытаний показали следующее.

Геометрические параметры сбросного потока. Расширение струи на низовой грани плотины и на носке цилиндрического трамплина за пролётами центральной секции № 3 – 6 при открытии затворов на 1,5 м и отм. УВБ близкой к отм. НПУ значительно меньше, чем при открытии затворов на 3 м и выше (рис. 2), что, в свою очередь, следовало ожидать.

В случае изолированной работы центральной секции и, например, пролёта № 5 с открытием его затвора на 1,5 м, расширение струи также происхо-

дит не так интенсивно (рис. 3), как это было отмечено при проведении испытаний в 2009 г. [1]. При открытии затвора пролёта № 5 на 1,5 м струя на сходе с носка расширяется примерно вдвое с 12 м до 25 – 30 м, а при открытии затвора на 6 м поток расширяется более чем на 3/4 ширины центральной секции водосброса.

Работа крайних пролётов № 1 – 2 и № 7 – 8 при открытии их затворов на 1,5 и несоблюдении действующего регламента маневрирования, т.е. открытие затвора пролёта № 7 без открытого затвора пролёта № 8 и открытие затвора № 2 без работающего пролёта № 1, не приводит к отклонению потока в сторону левого берега и разделительной стены (рис. 4), как это отмечалось при проведении лабораторных исследований и полном открытии затворов [2, 3].

Но, с другой стороны, трамплины-виражи, расположенные в крайних пролётах, не дают струе отклоняться к оси русла, как это предусмотрено конструктивной особенностью этих виражей. В этой связи не рекомендуется использовать длительное время пролёты № 2 и № 7 без их совместной работы с пролётами № 1 и № 8.

При совместной работе пролётов № 1 – 2 и № 7 – 8 обеспечивается надёжное отклонение отброшенной струи от разделительной стены и левого берега (рис. 5), однако это отклонение к оси русла также несколько меньше, чем при работе этих же пролётов с открытием их затворов на 3 м и выше.

Дальность отлета струи от плотины. Проведенные испытания эксплуатационного водосброса при открытии затворов на 1,5 м показали, что дальность отброса струи от плотины несколько меньше, чем при открытии на 3 м и выше, что обусловлено снижением удельных расходов и увеличением потерь на трение на низовой грани плотины [4]. На рис. 6 приведены фотографии с отбросом струи при открытии затвора на 1,5 м (испытания 2021 г.) и на 3 м (испытания 2009 г.).



а)



б)

Рис. 2. Расширение потока на цилиндрическом носке-трамплине при работе пролётов № 3 и № 6 с открытием их затворов на: а) 1,5 м (2021 г.) и б) 6,0 м (2009 г.)



Рис. 3. Расширение струи на цилиндрическом носке-трамплине при работе пролёта № 5 с открытием его затвора на 1,5 м; отм. УВБ = 255,35 м

Дальность отлета струи при открытии затвора, например на 3 м, может достигать 170 – 180 м от плотины, а при открытии затвора на 1,5 м струя падает на расстоянии 130 – 140 м от носка трамплина.

При этом можно ожидать некоторое смещение ямы размыва вверх по течению при длительной работе водосброса в таком режиме. В свою очередь, за счёт снижения практически вдвое удельных расходов на входе струи в воду и, соответственно, уменьшения энергии сбросного потока при открытии затворов на 1,5 м, развитие ямы размыва займёт более длительный период. Тем не менее, рекомендуется следить за возможными деформациями русла в нижнем бьефе по результатам подводно-технических обследований, которые необходимо проводить с периодичностью, указанной в СТО РусГидро 02.01.109-2013.

Дальность отлёта струи за крайними пролётами № 1 – 2 и № 7 – 8 на трамплинах-виражах состав-

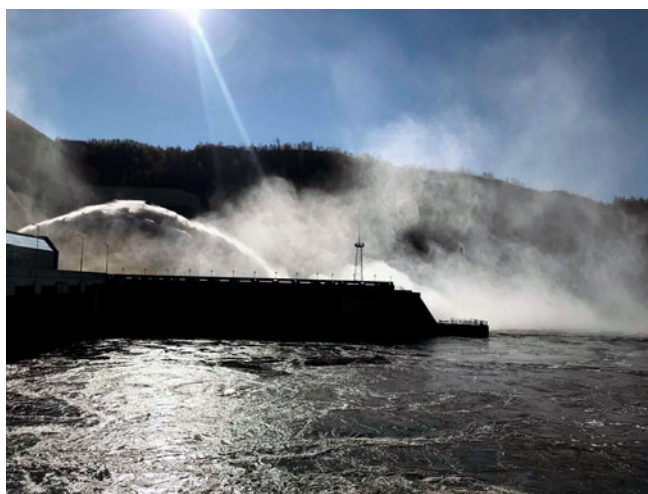


Рис. 4. Общий вид струи при работе пролёта № 7 и открытии его затвора на 1,5 м и полностью закрытом затворе пролёта № 8



Рис. 5. Совместная работа пролётов №№ 1 – 2 и №№ 7 – 8 при открытии их затворов на 1,5 м

ляет по данным испытаний 2021 г. при открытии затворов на 1,5 м около 100 – 110 м. Несколько больше эти значения при открытии затворов на 3 м и выше. Дальность отброса струи по результатам испытаний 2008 – 2009 гг. в крайних пролётах достигала до 140 – 150 м.



а)



б)

Рис. 6. Дальность отлёта струи при работе пролёта № 3 с открытием его затвора на: а) 1,5 м (2021 г.) и б) 3 м (2009 г.)



Рис. 7. Насыщение сбросного потока воздухом при работе пролётов № 3 – 6 с открытием их затворов на 1,5 м

Работа трамплинов-аэраторов на низовой грани плотины. При проведении испытаний в 2021 г. отмечено, что при открытии затворов на 1,5 м струя отрывается от второго уступа-аэратора, расположенного на отметке 228,80 м и касается низовой грани плотины в районе отметок 190,00 – 200,00 м; при этом видно, что струя сильно аэрирована. Аэраторы на низовой грани работают удовлетворительно, в том числе при новых открытиях затвора на 1,5 м. Доступ воздуха в подструйное пространство потока является практически свободным (рис. 7).

Как показали предшествующие испытания водосброса, понижение давления (вакуум) под струей при открытии затвора на 3 м может достигать до 10–15 кПа, тем самым способствуя свободному захвату воздуха и насыщению им сбросного потока.

Брызгообразование при работе эксплуатационного водосброса. В условиях работы эксплуатационного водосброса при открытии затворов на 1,5 м отмечено сильное брызгообразование, особенно интенсивное за местом падения струи. При постепенном открытии затворов от одного до всех включительно, брызгообразование в нижнем бьефе также имеет тенденцию к росту.

При совместной работе пролётов № 1 – 2 и № 7 – 8 без включения в работу центральной секции (пролётов № 3 – 6) облако брызг становится более интенсивным (рис. 5 и 6).

Облако водяной пыли в зависимости от направления ветра приводит к обводнению склона левого берега, что может приводить к процессу сползания в русло осыпей. Кроме того, работа водосброса способствует к обводнению площадки правого берега, где расположена проходная на ГЭС.

Исключить сильное брызгообразование при работе водосброса Бурейской ГЭС, к сожалению, не представляется возможным. Эта проблема всех аналогичных сооружений, использующих отброс потока от плотины. Тем не менее, при открытии затворов на 1,5 м, брызгообразование несколько



Рис. 8. Режим течения перед затвором № 6 с образованием воздушных воронок при открытии его на 1,5 м в период проведения испытаний в 2021 г.; отм. УВБ = 255,35 м

меньше, чем при открытии затворов на 3 м и выше. При этом соблюдение регламента маневрирования затворами и работа, в первую очередь, центральной секции, приводит к некоторому снижению брызгообразования, но, как отмечалось ранее, исключить его полностью при любых сочетаниях работы пролётов водосброса невозможно.

Оценка вибрации затворов при их открытии на 1,5 м. При проведении испытаний требовалось оценить наличие или отсутствие вибраций основных затворов при их подъёме и установке на промежуточные подхваты на 1,5 м.

При подъёме затворов и отм. УВБ = 255,35 м была зафиксирована небольшая вибрация, которая несколько снижалась при установке затвора на подхваты. Эта вибрация может быть связана с натяжением тросов и вибрациями самого крана и затвора при его подъёме. Наибольшая по ощущениям вибрация была отмечена при подъёме и установке на 1,5 м затвора пролёта № 5. При постепенном дальнейшем открытии всех затворов, установке их на подхваты и работе всего водосливного фронта в таком режиме вибрации снижались до минимума и практически не ощущались.

Причины небольших вибраций основного затвора при открытии его на 1,5 м с установкой на подхваты могут быть связаны с неустойчивым режимом течения, которое образуется в пролёте перед затвором. При проведении испытаний отмечено образование воронок перед затвором (рис. 8). Как видно из данного рисунка, воронки образуются у правого быка пролёта № 6, а у противоположного быка воронки отсутствуют. Это связано с тем, что пролёты № 1 – 2 и № 7 – 8 были полностью закрыты, но при этом работали пролёты № 4 и № 5 и, соответственно, воронки образовывались у быков ближайших к соседним пролётам, которые были закрыты. При работе всего фронта и открытии затворов на 1,5 м воронок перед затворами не наблюдалось во всех пролётах водосброса.

Воронкообразование со стороны верхнего бьефа приводит к проникновению в поток воздуха, что нарушает его сплошность. При этом могут образовываться закрученные жгуты, которые, в свою очередь, могут приводить к вибрациям и динамике затворов.

На воронкообразование влияет и степень стеснения потока быками перед затвором, которое может приводить к образованию отрывных зон и некоторому сжатию потока. Ещё одной из причин воронкообразования может явиться несимметричный подход потока к пролётам водосброса, особенно при раздельной их работе.

При подъёме затвора на 3 м за счёт увеличения расходов и скоростей течения на подходе к водосбросу данное явление (образование воронок в районе обтекания быков) зафиксировано не было; вибрации затвора при этом отсутствовали, даже при работе одного изолированного пролёта водосброса.

В этой связи по результатам проведенного испытания рекомендовано работать всеми пролётами эксплуатационного водосброса при открытии затворов на 1,5 м и исключать, по возможности, долгую работу отдельных пролётов при таком открытии.

Гидравлический режим в нижнем бьефе гидроузла. Результаты выполненных испытаний показали, что при работе всего водосбросного фронта при открытии затворов на 1,5 м и пропуске максимального расхода, равного $1400 \text{ м}^3/\text{с}$, основное воздействие на откосы правого и левого берегов оказывает волнение, инициируемое энергией сбросного потока.

Максимальная высота волн у правого берега наблюдается на расстоянии около 450 – 500 м от оси плотины и достигает в этой зоне 0,5 – 0,7 м. Такая высота волн также подтверждается и расчётами, выполненными по рекомендациям [5]. Воздействие волнения на откос правого берега при открытии затворов на 1,5 м не должно приводить к его повреждению или разрушению. Отметим, что по результатам лабораторных исследований максимальная высота волн у правого берега может составлять от 2 до 5 м [6] в зависимости от сбросного расхода.

В целом можно констатировать, что при открытии затворов водосброса на 1,5 м высота волн ниже, чем при открытии их на 3 м и на большие значения, что, в свою очередь, приводит к снижению воздействий на крепление правого берега, обеспечивая его безопасную работу при таком режиме работы водосброса.

Выводы

1. При работе отдельных пролётов центральной секции эксплуатационного водосброса и открытии затворов на 1,5 м наблюдается расширение струи на низовой грани и носке плотины, но менее интен-

сивное, чем при открытии затворов на 3 м и выше. Струя за крайними пролётами № 1 – 2 и № 7 – 8 отклоняется трамплинами-виражами к оси русла, не воздействуя при этом на склон левого берега и раздельную стену.

2. Дальность отлета струи за центральной секцией водосброса при открытии затвора на 1,5 м составляет 130 – 140 м, а за трамплинами-виражами в крайних пролётах 100 – 110 м.

3. Трамплины-аэраторы на низовой грани плотины работают удовлетворительно, струя, отрываясь от них, насыщается достаточным количеством воздуха. Поток в пределах низовой грани плотины сильно аэрирован.

4. При работе эксплуатационного водосброса отмечено брызгообразование, особенно интенсивное при работе крайних пролётов № 1 – 2 и № 7 – 8 без включения в работу центральной секции с пролётами № 3 – 6, которое приводит к обводнению склона левого берега, раздельной стены и площадки на правом берегу, исключить которое практически невозможно.

5. При подъёме затвора на 1,5 м и отм. УВБ = 255,35 м зафиксированы небольшие вибрации, которые снижаются при установке затвора на подхваты. Наибольшая вибрация наблюдается при отдельной работе пролётов водосброса, что может быть связано с режимом течения в верхнем бьефе и образованием воронок перед затворами. При работе всего водосбросного фронта с открытием затворов на 1,5 м вибрации практически отсутствуют.

6. Использование открытия затворов на 1,5 м для аккумуляции части объёма паводков и форсировки уровней воды в водохранилище по результатам проведенных испытаний считаем допустимым.

Список литературы

1. Петров О. А., Попов А. В. Гидравлические испытания эксплуатационного водосброса Бурейского гидроузла // Гидротехническое строительство. 2020. № 5. С. 18 – 24.
2. Васильев А. В., Дерюгин Г. К., Петров О. А., Прокофьев В. А. Лабораторные исследования гидравлики нижнего бьефа при работе эксплуатационного водосброса Бурейского гидроузла // Гидротехническое строительство. 2008. № 6. С. 36 – 38.
3. Дерюгин Г. К., Петров О. А., Судольский Г. А. Обоснование гидравлическими лабораторными исследованиями проекта защитных стен из буронабивных свай в нижнем бьефе Зейской и Бурейской ГЭС // Известия ВНИИГ. 2016. Т. 281. С. 80 – 89.
4. Дерюгин Г. К. К вопросу об определении дальности отлета струи за водосливной плотиной // Известия ВНИИГ. 2012. Т. 267. С. 28 – 33.
5. Климович В. И., Петров О. А. Методика определения характеристик волнения в нижнем бьефе гидроузлов при работе водосбросных сооружений // Известия ВНИИГ. 2014. Т. 274. С. 105 – 112.
6. Петров О. А. Исследования волнообразования в нижнем бьефе Бурейского гидроузла // Гидротехническое строительство. 2007. № 10. С. 43 – 47.