



УДК 627.8

DOI: 10.17673/Vestnik.2023.03.01

С. В. ЕВДОКИМОВ

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИЙ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ЗАТВОРОВ ВОДОСБРОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЭС

**ANALYSIS OF THE RESULTS OF THE STUDY OF VIBRATIONS THE SUPPORTING
STRUCTURE OF THE GATES OF SPILLWAY STRUCTURES DURING
THE OPERATION OF HYDROELECTRIC POWER PLANTS**

Рассмотрены особенности работы основных затворов водосбросных сооружений в период эксплуатации ГЭС. Как известно, основные затворы водосброса устанавливаются на выходе водосбросных отверстий в нижний бьеф гидроэлектростанции. Затворы служат для перекрытия отверстий водосбросного сооружения, открываемого для сброса воды в паводок, а также в случае катастрофы с вышележащим гидроузлом, тем самым обеспечивая надежную работу всего водопроводящего тракта гидроэлектростанции. На примере Жигулевской ГЭС в период эксплуатации затворов водосбросных сооружений были определены напряжения в конструкциях затвора, вибрации элементов затвора и величины усилий в штанге затвора при операциях по подъему и опусканию, что позволило выявить дефекты в их работе и определить рекомендации по их устранению. Кроме этого, в статье рассмотрены результаты исследования вибраций несущей конструкции затворов ГЭС, которые возможно было получить только после выявления особенностей работы основных затворов на водосбросных сооружениях в период эксплуатации гидроэнергетической установки. Относительно характера и происхождения измеренных колебаний можно сказать, что четкого объяснения причин и физического характера колебаний затвора на ГЭС привести не представляется возможным, поэтому в статье рассмотрены два случая в результате которых могут возникнуть периодические незатухающие колебания затвора. Поскольку установлено, что зарегистрированные

The article discusses the features of the operation of the main gates of spillway structures during the operation of the HPP. As it is known, the main spillway gates are installed at the outlet of the spillway openings into the downstream of the hydroelectric power station. The gates serve to block the openings of the spillway structure, which is opened to discharge water into a flood, as well as in the event of a disaster with an overlying hydroelectric power plant, thereby ensuring reliable operation of the entire water supply path of the hydroelectric power plant. Using the example of the Zhigulevskaya HPP, during the operation of the gates of the spillway structures, stresses in the gate structures, vibrations of the gate elements and the magnitude of the forces in the gate rod during lifting and lowering operations were determined, which made it possible to identify defects in their operation and determine recommendations for their elimination. In addition, the article discusses the results of the study of vibrations of the supporting structure of the gates of the hydroelectric power plant, which could be obtained only after identifying the features of the main gates on the spillway structures during the operation of the hydropower plant. Regarding the nature and origin of the measured oscillations, it can be said that it is not possible to give a clear explanation of the causes and physical nature of the gate oscillations at the HPP, therefore, the article considers two cases as a result of which periodic undamped gate oscillations may occur. Since it has been established that the periodic undamped oscillations registered on the gate could only be caused by a periodic disturbing force, the cause of such oscil-

на затворе периодические незатухающие колебания могли быть вызваны только периодической возмущающей силой, то причиной возникновения таких колебаний может явиться периодический отрыв вихрей от нижней грани затвора. В результате анализ исследования вибраций несущей конструкции затвора показал, что для затвора основными возмущающими силами могли явиться: пульсация давления потока на верхнюю и нижнюю поверхности затвора; динамические силы, возникающие при отрыве вихрей от нижней грани затвора при истечении воды из-под него. Приведены рекомендации по избеганию вибрации затвора в последующие периоды эксплуатации.

Ключевые слова: затворы водосбросных сооружений, период эксплуатации ГЭС, колебания, нагрузка, осциллограмма, уплотнение затвора, вибрация затворов, измерение колебаний, динамическая сила, пульсация гидростатического давления, гидроэнергетические установки

Наиболее часто основные затворы водосброса устанавливаются на выходе водосбросных отверстий в нижний бьеф гидроэлектростанции. Затворы служат для перекрытия отверстий водосбросного сооружения, открываемого для сброса воды в паводок, а также в случае катастрофы с вышележащим гидроузлом. Ввиду ожидаемых вибраций затвора при промежуточном положении, конструкция затвора, как правило, выполнена из стального литья.

Рассмотрим конструкцию затворов водосбросных сооружений на Жигулевской ГЭС. Затвор состоит из двух частей, соединенных между собой при помощи болтов. В качестве опорно-ходовых частей служат полозья из древо-пластика, скользящего по полированной цилиндрической поверхности рабочего пути. Для уменьшения коррозии и связанного с ней увеличения коэффициента трения опорные поверхности пути выполняются в виде наплавки электродами из нержавеющей стали. Для предохранения затвора от колебаний в пазу со стороны верхнего бьефа устанавливаются обратные буферные колеса. Поперечное смещение затвора в пазах и перекос его ограничиваются торцевыми колесами, а нижнее уплотнение затвора выполняется ножевым [1, 2].

Вертикальное и верхнее уплотнения запроектированы со стороны верхнего бьефа из резины специального профиля. Подъем и опускание затвора осуществляются за одну точку при помощи жесткой штанги. Дожим затвора, при опускании его под напором, осуществляется весом траверсы, которая подвешивается к основным подвескам мостового крана. Конструкция верхнего звена штанги обеспечивает

подвеску затвора на подхвате как при полном открытии, так и при промежуточном положении затвора.

lations may be the periodic separation of vortices from the lower face of the gate. As a result, the analysis of the study of vibrations, the supporting structure of the shutter showed that the main disturbing forces for the shutter could be: pulsation of the flow pressure on the upper and lower surfaces of the shutter; dynamic forces arising when the vortices are detached from the lower face of the shutter when water flows out from under it. The article provides recommendations for avoiding vibration of the shutter in subsequent periods of operation.

Keywords: gates of spillway structures, the period of operation of hydroelectric power plants, vibrations, load, oscillogram, seal of the gate, vibration of the gates, measurement of vibrations dynamic force, pulsation of hydrostatic pressure, hydropower plants

подвеску затвора на подхвате как при полном открытии, так и при промежуточном положении затвора.

На Жигулевской ГЭС для предохранения конструкции затвора от ударов плывущих бревен верховая грань последнего покрыта деревянной обшивкой из вертикальных брусев, которые в период эксплуатации были удалены [3, 4].

Закладные части состоят из рабочих и обратных путей, облицовок пазов и порога.

В пределах отверстия затвора (на высоту до 5 м) пути и облицовки объединены в жесткие коробки, которые при монтаже крепились к жестким горизонтальным армофермам и затем бетонировались в общей штрабе. Ввиду ожидаемых разъеданий металла в пазах сами коробки были выполнены из стального литья.

В период эксплуатации затворов водосбросных сооружений на ГЭС были выявлены следующие дефекты в их работе.

1. Неудовлетворительная работа верхнего горизонтального уплотнения. После нескольких операций, а иногда одной или двух, уплотнение срывает, в результате чего на большинстве затворов уплотнения были неисправны и имела место большая фильтрация воды.

2. Выяснилось, что для посадки затворов монтажной организацией была применена специальная траверса с полипастами, использование которой для операции с затворами связано со значительными затратами времени. При этом попытка внедрения обтекателя в нижней части затвора и горизонтальной полки с напорной стороны, наличие которых должно облегчить посадку затворов, результатов не дала.

3. Наблюдался значительный износ опорных полозьев затворов, достигающий в некоторых случаях аварийных размеров, при которых обнажаются болты, стягивающие набор на древо-пластике. Причиной ненормального износа полозьев следует считать неудовлетворительное качество монтажа опорно-ходовых рельс на закладных частях, а именно наличие ступенчатых стыков и острых боковых, а также медных наплавов электросварки. Кроме того, поверхность рельс была загрязнена цементной коркой, что также способствовало износу.

В начале эксплуатации ГЭС были проведены испытания затворов для определения напряжений в конструкциях затвора, вибрации элементов затвора и величины усилий в штанге затвора при операциях по подъему и опусканию [5, 6].

Далее проанализируем результаты самих испытаний и расчетные величины без приведения самих расчетов, которые характеризуют особенности работы затворов водосбросных сооружений на ГЭС в период эксплуатации. Основные характеристики затворов следующие:

- 1) вес затвора (без учета деревянной обшивки) – 28,23 т;
- 2) вес штанги – 8,13 т;
- 3) сила трения в опорных полозьях, гидростатическая нагрузка расчетная на затвор – 41,4 т;
- 4) вес дожимной траверсы – 65 т;
- 5) расчетное подъемное усилие – 186 т;
- 6) грузоподъемность крана – 400 т.

Рассмотрим схему размещения по затвору виброметров с соответствующей нумерацией. Такое расположение вибродатчиков отвечает условиям измерения вибраций затвора в пролете и относительно опор.

Для случая измерения вибраций затвора относительно опор по вышеуказанной схеме частота собственных колебаний составляла 52 Гц. Величина частоты собственных колебаний, полученная расчетом, колеблется в пределах 56–138 Гц в зависимости от расчетной схемы размещения затвора относительно опор. В период эксплуатации затвор 104ГК полностью открыт. Два затвора 110ГК работают синхронно при частичном или полном открытии.

Из этого можно заключить, что все четыре случая сочетания работы затворов при натуральных испытаниях ни качественно, ни количественно не отличались друг от друга, что подтверждает надежность результатов натуральных испытаний [7].

Вибрации затвора исследовались на заданном открытии затвора при установившемся режиме истечения воды из-под него. Производились записи показаний всех вибродатчиков.

При анализе осциллограмм было обнаружено, что вибрации на всех частичных открытиях затвора представляют собой наложение друг на друга двух типов колебаний:

а) колебания с постоянной за все время записи амплитудой и частотой порядка 135–140 Гц;

б) сравнительно низкочастотные колебания с периодическими возмущениями, из которых не предоставляется возможным выделить гармонические составляющие. Преобладающие частоты этих колебаний, вероятно, находятся в пределах 15–40 Гц.

В соответствии со сказанным можно сделать следующий вывод:

1. Аперiodические и импульсные явления на затворе с преобладающими частотами порядка 15–40 Гц всеми вибродатчиками записаны с искажениями. Поэтому имеющимися в нашем распоряжении средствами они не могут быть расшифрованы.

2. Гармоническая высокочастотная составляющая, наложенная на указанные выше колебания, может быть расшифрована по записям всех вибродатчиков.

Однако анализ записей вибродатчиков показал, что чувствительность у них недостаточна для отчетливой записи колебаний с частотами до 40 Гц и имевшими место в испытаниях, по всей вероятности, малыми амплитудами. Ввиду этого было принято решение провести расшифровку только колебаний с частотами 135–140 Гц по показаниям датчиков. Все другие колебания расшифровать по амплитуде не представилось возможным.

Имеющиеся в нашем распоряжении осциллограммы расшифровывались следующим образом.

Вдоль осциллограммы, т. е. по времени в семи точках измерялась двойная амплитуда высокочастотной составляющей, а также период колебаний. Измерение производилось при увеличении осциллограмм в 10 раз и более.

В том же масштабе и при том же увеличении производилось измерение тарировочного отброса.

Для разных открытий затвора оказалось, по частоты мало изменяются и находятся в пределах 136–140 Гц. В течение же одного опыта (т. е. при одном открытии затвора) частота колебаний держится строго постоянной.

Величины размаха (двойной амплитуды) колебаний затвора в трех точках, где были установлены датчики, показывают, что размах колебаний максимален в верхней половине затвора и доходит до 0,4 мм.

Колебания затвора в вертикальном направлении оказались при всех частичных открытиях

затвора пренебрежимо малы. Основная частота осциллограмм датчика оказалась равной его собственной частоте, что свидетельствует о том, что датчик раскачивался под влиянием случайных толчков, без каких бы то ни было систематических вертикальных колебаний затвора. Амплитуда колебаний датчика с частотой 137–140 Гц оказывается пренебрежимо малой и находится в пределах точности тарировок и отсчетов.

Давления по поверхности затвора измерялись при постоянных открытиях затвора всеми датчиками в соответствии со схемой их установки на затворе. Открытия повторялись неоднократно и делались повторные измерения, что было вызвано желанием избавиться от влияния случайных повышений или понижений давления, связанных с колебаниями уровней бьефов в небольших пределах (1ч – 2 м вод. ст.). Повторение открытий и замеры производились через значительные промежутки времени. При обработке результатов экспериментов принималось во внимание среднее арифметическое значение показаний приборов при ряде повторных опытов. Так, для положения затвора на пороге и подъеме его на 2 и 3 м принималось среднее из показаний приборов в пяти опытах, для открытий затвора на 1 м – три опыта, в остальных случаях – два опыта. При рассмотрении результатов опытов было обнаружено, что датчики, установленные на нижней грани затвора, оказались неисправными, так как, по всей вероятности, давление на них оказалось выше их предела измерений.

Ввиду этого представилось возможным рассмотреть только распределение давлений по верховым и низовым поверхностям затвора. Эпюры давлений для трех открытий затвора в двух сечениях показывают, что в середине пролета затвора распределение давлений близко к обычно получаемому на моделях. В частности, имеет место практически гидростатическое распределение давлений по всей высоте затвора, за исключением его нижней части, где наблюдается вполне естественное падение давления с верховой стороны и некоторое повышение давления с низовой стороны затвора по сравнению с гидростатическим распределением давлений [8, 9].

Вблизи паза картина распределения давления другая, значительно искаженная в сравнении с рассмотренной выше, что, по всей вероятности, объясняется искажением потока при обтекании пазовых конструкций и местным расстройством вертикальных уплотнений, приводящих к протечкам воды.

По результатам замеров давлений были также вычислены (как осредненные из обрабо-

танных соответственным образом показаний датчиков давления) пьезометрический уровень непосредственно вблизи низовой поверхности затвора, расчетный напор затвора (как разность средних пьезометрических уровней с верховой и низовой стороны затвора).

Подъемные и опускные усилия затвора, точнее – усилия в штанге затвора при его подъеме или опускании под напором, измерялись на двух затворах. На затворе проектной конструкции, на котором исследовалась вибрация и распределение давлений, и на затворе реконструированном [10].

Измерение усилий на реконструированном затворе было проведено успешно, и получена осциллограмма усилий в штанге этого затвора при нескольких подъемах и опусканиях вплоть до полной посадки затвора на порог.

На осциллограмме отмечены все операции, производившиеся с затвором с помощью крана, а также характер движения самого затвора. Рассмотрение осциллограммы позволяет охарактеризовать процесс опускания реконструированного затвора следующим образом: в начале опускания, пока затвор находится выше потолка водосброса, усилие в штанге равно весу затвора со штангами в воде. По мере перекрытия отверстия усилие, направленное вниз и растягивающее штангу, уменьшается за счет возрастания сил трения в опорах и гидравлических сил, направленных вверх. На высоте затвора от порога примерно на 2,5 м указанные силы, препятствующие опусканию затвора, становятся равными его весу в воде. Начиная с этого момента затвор может опускаться только под действием силы веса штанги. Без действия этой силы затвор зависает в промежуточном положении. Ввиду того, что штанга имеет возможность перемещаться вертикально относительно затвора на ход примерно 50 мм – на величину овального отверстия в проушинах затвора, затвор опускается рывками.

Таким образом, можно выявить причину такого явления, которая заключается в следующем: как только затвор завис первый раз, после начала его опускания, штанга, до сих пор растянутая его весом, опускается под собственным весом независимо от затвора и усилие в ней равно ее растяжению от собственного веса. После того как штанга проходит путь, равный величине ее свободного перемещения относительно затвора, она опирается на затвор, разгружается от растяжения собственным весом и нагружается этим весом сам затвор. Как только нагрузка на затвор от веса штанги становится более чем превышение сил трения покоя и направленных вверх гидравлических сил над весом самого затвора, затвор снова начинает движение. При

этом уменьшение сил трения после момента начала движения приводит к тому, что под действием избыточного веса штанги и без какого-либо удерживания затвор двигается вниз ускоренно на пути, равном свободному взаимному перемещению штанги и затвора. В конце этого пути происходит торможение затвора и резкое растяжение штанги инерционными силами, приложенными к штанге со стороны затвора.

Вследствие этого мгновенные значения инерционных растягивающих сил достигают при этом 30–50 т, т. е. нередко превышают полный вес затвора. После торможения затвора он снова зависает и, если штанга продолжает опускаться, рассмотренный процесс движения повторяется. Если оказывается в какой-то момент, что превышение сил трения покоя и направленных вверх гидравлических сил над весом затвора больше, чем вес штанги, происходит полное зависание затвора и посадка его оказывается невозможной. Приходится поднимать затвор выше, чем положение, соответствующее первому зависанию, и затем опускать его снова. Таким образом, реконструированный затвор далеко не всегда удается посадить с первой попытки. Осциллограмма усилий в штанге затвора показывает также, что в процессе подъема и опускания имеют место колебания в системе «затвор-кран» с частотой 3 Гц. Указанная частота оказалась практически одинаковой в течение всего периода подъема и опускания как затвора проектной конструкции, так и реконструированного (включая периоды зависания, дожима и переключения направления движения).

По результатам исследований, проведенных автором по выявлению особенностей работы основных затворов на водосбросных сооружениях в период эксплуатации ГЭС, было установлено следующее. Имеющиеся осциллограммы вибраций затвора показали, что основной формой зарегистрированных колебаний являются затухающие периодические колебания с частотой 136–141 Гц. При этом наиболее вероятно, что составляющие вибрации с более низкими частотами, если они имелись в спектре колебания, имеют амплитуды существенно меньше, чем изначально. Свидетельством этого является отсутствие на осциллограммах низкочастотных колебаний с амплитудами большими, чем 0,4–0,5 Гц от амплитуды высокочастотных, поскольку одновременно известно, что:

– во-первых, вибродатчики завывают амплитуды колебаний с частотами менее 140 Гц по сравнению с амплитудами при 140 Гц;

– во-вторых, низкочастотные колебания, видимые на осциллограммах, есть в основном собственные колебания датчиков [1–3].

Относительно характера и происхождения измеренных колебаний можно сказать, что четкого объяснения причин и физического характера колебаний затвора на ГЭС привести не представляется возможным. Однако некоторые соображения по этому вопросу нами могут быть высказаны.

Периодические незатухающие колебания затвора могут возникнуть в следующих случаях:

а) Если колебательная система, представляемая затвором, линейна (т. е. имеет место линейная зависимость упругих сил от смещения и сил сопротивления от скорости смещения) – при воздействии на затвор периодической непрерывной во времени возмущающей силы той же частоты, что и отмеченные колебания затвора. Или же при воздействии на затвор строго периодической импульсной кратковременно прилагаемой нагрузки с частотой в целом четное число раз кратной собственной частоте затвора. В последнем случае период возмущающей силы должен бы быть таковым, чтобы в течение этого периода затухание собственных колебаний затвора не было бы ощутимо и частота колебаний затвора в этом случае будет равна его собственной частоте [11].

б) Если колебательная система, представляемая затвором, нелинейная – в случаях, указанных для линейных систем, а также при автоколебательном процессе. Одновременно существенно, что в отличие от линейных систем амплитуда и частота колебаний в нелинейных системах взаимно связаны и при данной частоте и амплитуде возмущающей силы в нелинейной системе может установиться вполне определенная величина амплитуды колебаний [12].

Анализ исследования вибрации затвора показал, что для затвора основными возмущающими силами могли явиться:

1) пульсация давления потока на верхнюю и нижнюю поверхности затвора;

2) динамические силы, возникающие при отрыве вихрей от нижней грани затвора при истечении воды из-под него.

В отношении характера пульсации давлений известно, что для водоводов со сравнительно плавным подводом потока к затвору, пульсации давлений как на верховой, так и на нижней его поверхностях носят неустановившийся аperiodический характер [13].

При этом известно, что такой характер носят пульсации давления даже с нижней стороны, т. е. там, где имеются оторвавшиеся от затвора вихри, блуждающие в расширяющемся потоке за затвором. В то же время, динамические силы, возникающие при отрыве вихрей от нижней грани затвора, могут носить во многих случаях периодический характер.

Поскольку зарегистрированные на затворе периодические незатухающие колебания могли быть вызваны только периодической возмущающей силой, представляется, что причиной возникновения таких колебаний может явиться периодический отрыв вихрей от нижней грани затвора [14].

Вихреобразование на передней грани бычка, равно как и при обтекании нижней грани затвора, также может быть в определенных условиях периодическим. Однако при расширении потока за сжатым сечением у оголовка бычка гидравлические явления ничем не отличаются от таковых при расширении потока за затвором, где наблюдается аperiodический характер пульсации давления при возможных периодических возмущениях под затвором. Это дает некоторые основания полагать, что пульсация давления на верховой поверхности затвора не является той периодической возмущающей силой, которая вызывает колебания затвора.

При этом следует четко представлять, что сделанное выше разделение гидравлических сил проводится достаточно условно по их преимущественному влиянию на затвор, имея в виду, что все силы действуют совместно и что действительное колебание затвора есть сложный процесс взаимодействия затвора и всех внешних сил, из которого выделено для рассмотрения главное и наиболее отчетливо видимое колебание.

С другой стороны, рассмотрение конструкции затвора показывает, что зависимость сил от деформаций нелинейная. Так, ввиду увеличения внедрения рельса в ДСП при увеличении нагрузки увеличивается удельная сила, необходимая для дальнейшей деформации. Кроме того, повреждение полозьев (строгание ДСП на клин) приводит к неплотному прилеганию их к рельсам по высоте затвора, что также вызывает нелинейность, так как длина и площадь размещения затвора зависит от его деформации.

Таким образом, полагаем наиболее вероятным, что колебания затвора возникают при воздействии отрыва вихрей от него на нелинейную колебательную систему. Можно представить процесс колебаний следующим образом.

Возникновение переменных сил (из-за отрыва вихрей, пульсации давлений или любых других причин) приводит к колебаниям затвора на частоте, определяемой амплитудой внешнего воздействия. Колебание затвора приводит к синхронизации автоколебательного процесса отрыва вихрей с колебанием затвора. Синхронизация приводит к увеличению амплитуд и частот колебаний затвора, что, в свою очередь, повышает частоту отрыва вихрей и,

при данной скорости течения воды, приводит к уменьшению мощности вихрей и величины динамических сил [15,16]. Таким образом, происходят два взаимно противоположных процесса: с одной стороны, возрастание частот колебаний затвора в связи с ростом амплитуд этих колебаний и с ростом мощности импульсов сил, а с другой – уменьшение мощности вихрей и величины динамических сил с ростом частоты отрыва вихрей от затвора.

В этих условиях всегда устанавливается режим незатухающих периодических колебаний затвора, с постоянной амплитудой, синхронизированный с отрывом вихрей от его нижней грани. Этот режим является автоколебанием в системе «затвор-поток». Так можно сформулировать рабочую гипотезу о характере и происхождении зарегистрированной вибрации затвора.

В отношении формы колебания затвора можно заключить, что затвор имеет как изгибные колебания в пролете, так и колебания верхней секции относительно нижней. Соотношение амплитуд датчиков, находящихся на одной горизонтали, приблизительно соответствует соотношению прогибов балки в точках, находящихся на расстоянии от опор указанным датчикам. В то же время для датчиков, поставленных в разных секциях в середине пролета, наблюдается значительная разность амплитуд. Поскольку также известно, что жесткость межсекционного болтового соединения примерно в 50 раз меньше жесткости секции, а опорные полозья верхней секции повреждены (стесаны на клин глубиной до 6 мм) и прилегание полозьев к рельсам в верхней секции относительно нижней как консольной защемленной балки.

По вопросу определения собственной частоты колебаний затвора можно отметить, что расчетное определение этой частоты и опытное ее определение в воздухе не дают совпадающих результатов. Это следует объяснить тем, что важнейшим фактором, определяющим частоту, являются условия размещения затвора и линейность или нелинейность их силовой характеристики. Поэтому расхождение результатов опытов и расчетов, равно как и расхождение результатов двух опытов при различном размещении затвора, является вполне естественным.

В отношении работы конструкции исследованного затвора агрегата и отдельного бычка, на который опирается этот затвор, следует высказать следующие соображения.

Установившихся нормативов, определяющих опасность или безопасность той или иной вибрации для затворов, в отечественной проектной практике, насколько известно, не имеется. Поэтому приведем нижеследующий ряд

попыток оценить воздействие измеренной вибрации на затвор.

1) Для оценки был проведен расчет на усталость материала несущей конструкции нижней секции затвора. В пределах справедливости принятой в расчете методики можно считать, что усталостное разрушение материала несущей конструкции затвора маловероятно.

2) Оценка усталостной прочности материала стяжных болтов в межсекционном соединении затвора проводилась по следующей расчетной схеме: нижняя секция затвора непрерывно во времени прилегает к опорным рельсам, а верхняя (за счет изготовления полозьев на клин) не прилегает к опорным рельсам непрерывно, а колеблется относительно нижней секции [17, 18]. Расчет болтового соединения по такой расчетной схеме показывает, что усталостная прочность материала стяжных болтов не обеспечивается.

В отношении работы отдельного бычка при вибрации затвора никаких заключений сделать не удалось ввиду недостаточности опытных данных. Можно только утверждать, что на разделительный бычок действуют инерционные силы от затвора с частотой до 140 Гц.

Исходя из высказанных соображений об опасности работы затвора водосбросных сооружений ГЭС при частичных открытиях ввиду значительной его вибрации, как по амплитуде, так и, в особенности, по частоте, и не имея каких бы то ни было данных по вибрации затворов в остальных пролетах, следует сделать следующий вывод. В процессе эксплуатации этих затворов работать ими при частичных открытиях можно только в крайне необходимых случаях.

Таким образом, по вибрации затворов можно заключить следующее:

1. Вибрации затвора имеют место при всех его открытиях под напором, включая подъем на 0,6 м выше потока отверстия и стояние на пороге.

2. Колебания затвора происходят в основном в горизонтальном направлении. Вертикальные колебания при установившихся открытиях затвора практически отсутствуют, а при подъеме имеют место только автоколебания в системе «затвор-штанга-кран» с частотой около 3 Гц.

3. Преобладающие горизонтальные колебания затвора являются автоколебаниями в системе «затвор-поток» с частотой 136–141 Гц и максимальной амплитудой, наблюдаемой в середине пролета верхней секции, в пределах 0,15–0,2 мм. Таким образом, вибрационные ускорения доходят до (7–8)g. Указанные колебания представляют собой как изгибные дефор-

мации затвора, так и его вращение в каждый момент времени вокруг мгновенной горизонтальной оси.

4. Одной из наиболее вероятных причин возникновения автоколебаний испытанного затвора является прилегание полозьев к опорным рельсам не по всей высоте затвора, а преимущественно посередине и в нижней секции, что происходит ввиду имеющегося строгания полозьев на клин. Поэтому устранение таких повреждений полозьев и обеспечение прилегания затвора к рельсам по всей его высоте (за счет изготовления и монтажа затвора, полозьев и накладных частей) может явиться одним из путей уничтожения и предотвращения зарегистрированных колебаний затворов.

5. Ввиду того, что имеющиеся материалы и расчеты свидетельствуют об опасности зарегистрированной вибрации для конструкции затвора при его частичном открытии, впредь до получения более полных данных дальнейших испытаний затворов, в процессе их эксплуатации допускать работу этих затворов при частичных открытиях следует только в крайне необходимых случаях.

6. При эксплуатации затворов в последующем следует обратить внимание на такие моменты, как: состояние полозьев и рельсов и их влияние на вибрацию затвора; напряжения в болтах и ригелях; изменение амплитуд вибрации по высоте затвора и пролету, положение мгновенной оси вращения затвора при автоколебаниях, если таковые будут иметь место; наличие низкочастотных вибраций; определение собственной частоты затворов паз под нагрузкой; определение вибрации отдельного бычка и непосредственное определение величины и характера сил, передаваемых затвором на бычка через опоры скольжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романов А.А. Жигулевская ГЭС. Эксплуатация гидротехнических сооружений. Самара: Издательский дом «Агни», 2010. 360 с. Кн. I.
2. Романов А.А. Куйбышевский гидроузел. История и жизнь. Самара: Арт-Лайт, 2018. 272 с.
3. Технический отчет о проектировании и строительстве Волжской ГЭС имени В.И. Ленина: в 2 т. 1950–1958 гг.
4. Бальзанников М.И., Зубков В.А., Кондратьева Н.В., Хуртин В.А. Комплексное обследование технического состояния строительных конструкций сооружений Жигулевской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2013. № 6. С. 21–27.
5. Бальзанников М.И., Иванов Б.Г., Михасек А.А. Система управления состоянием гидротехнических сооружений // Вестник МГСУ. 2012. № 7. С. 119–124.

6. Романов А.А., Евдокимов С.В. Разработка декларации безопасности гидротехнических сооружений Жигулевской ГЭС // Научное обозрение. 2015. № 4. С. 119–125.

7. Balzannikov M.I., Vyshkin E.G. Hydroelectric power plants reservoirs and their impact on the environment // Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 8-th International Scientific and Practical Conference. Vol. 1. Rezeknes Augstskova, Rezekne, RA Izdevnieciba. 2011. P. 171–174.

8. Бальзанников М.И., Холопов И.С., Соловьев А.В., Лукин А.О. Применение стальных балок с гофрированной стенкой в гидротехнических сооружениях // Вестник МГСУ. 2013. № 11. С. 34–41.

9. Balzannikov M.I., Seliverstov V.A. Characteristics of Substantiation of Water-Intake Parameters at WSPP as Component Parts of the Power Complex // Power Technology and Engineering 2015. Vol. 49. No 1. P. 22–26.

10. Бальзанников М.И., Рахманов С.О. О деформации тела грунтовой плотины русловой гидроэлектростанции // Вестник Волжского регионального отделения РААСН: сб. науч. тр. Н. Новгород: Нижегородский госуд. архит.-строит. ун-т, 2015. Вып. 18. С. 103–107.

11. Романов А.А., Евдокимов С.В. Результаты исследования колебаний бетонных частей секций Жигулевской ГЭС // Научное обозрение. 2015. № 7. С. 188–194.

12. Романов А.А., Евдокимов С.В., Селиверстов В.А. Исследования колебаний кровли Жигулевской гидроэлектростанции // Научное обозрение. 2015. № 14. С. 109–112.

13. Бальзанников М.И., Зубков В.А., Кондратьева Н.В., Хуртин В.А. Комплексное обследование технического состояния строительных конструкций сооружений Жигулевской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2013. № 6. С. 21–27.

14. Селиверстов В.А. Результаты исследований водоприёмного устройства гидроэнергетической установки с использованием программы «ANSYS» // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. № 89–2. С. 149–153.

15. Бальзанников М.И., Селиверстов В.А. Исследования влияния разделителей потока для применения в водоприёмных устройствах гидроэнергетических установок // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». 2009. № 3 (25). С. 199–205.

16. Свитала Ф., Галицкова Ю.М. Использование гидравлических энергоагрегатов с наклонной осью для малых ГЭС // Научное обозрение. 2014. №10 (2). С. 450–456.

17. Елистратов В.В., Бальзанников М.И. Гидравлические исследования водовыпуска крупной насосной станции // Сборник науч. тр. Ленинградского политех. ин-та. 1986. № 415. С. 30–33.

18. Васильев Ю.С., Кубышкин Л.И. О технологии проектирования объектов гидроэнергетики // Гидротехническое строительство. 2014. № 7. С. 2–8.

REFERENCES

1. Romanov A.A. Zhigulevskaja GJeS. *Jekspluatacija gidrotehničkih sooruzhenij* [Zhigulevskaya hydroelectric station. Operation of hydraulic structures]. Samara, Publishing House “Agni”, 2010. 360 p.

2. Romanov A.A. *Kujbyshevskij gidrouzel. Istorija i zhizn'* [Kuibyshevsky hydroelectric complex. History and life]. Samara, Art-Light, 2018. 272 p.

3. *Tehnicheskij otchet o proektirovanii i stroitel'stve Volzhskoj GJeS imeni V.I. Lenina: v 2 tomah. 1950–1958 gg.* [Technical report on the design and construction of the Volzhskaya hydroelectric power station named after V.I. Lenin: in 2 volumes. 1950-1958].

4. Balzannikov M.I., Zubkov V.A., Kondratyeva N.V., Khurtin V.A. Comprehensive examination of the technical condition of building structures of the Zhigulevskaya hydroelectric power station. *Gidrotehničko stroitel'stvo* [Hydrotechnical construction], 2013, no. 6, pp. 21–27. (in Russian)

5. Balzannikov M.I., Ivanov B.G., Mikhasek A.A. Hydraulic structures state management system. *Vestnik MGSU* [MGSU Bulletin], 2012, no. 7, pp. 119–124. (in Russian)

6. Romanov A.A., Evdokimov S.V. Development of the declaration of safety of hydraulic structures of the Zhigulevskaya HPP. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific review], 2015, no. 4, pp. 119–125. (in Russian)

7. Balzannikov M.I., Vyshkin E.G. Hydroelectric power plants reservoirs and their impact on the environment. Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 8-th International Scientific and Practical Conference. Vol. 1. Rezeknes Augstskova, Rezekne, RA Izdevnieciba. 2011. P. 171–174.

8. Balzannikov M.I., Kholopov I.S., Soloviev A.V., Lukin A.O. Use of steel beams with corrugated wall in hydraulic structures. *Vestnik MGSU* [MGSU Bulletin], 2013, no. 11, pp. 34–41. (in Russian)

9. Balzannikov M.I., Seliverstov V.A. Characteristics of Substantiation of Water-Intake Parameters at WSPP as Component Parts of the Power Complex. Power Technology and Engineering 2015. V. 49. No. 1. P. 22–26.

10. Balzannikov M.I., Rakhmanov S.O. On deformation of the body of the soil dam of the channel hydroelectric power station. *Vestnik Volzhskogo regional'nogo otdelenija RAASN: sb. науч. tr.* [Bulletin of the Volga regional branch of RAASN: sat. scientific. tr.]. N. Novgorod, NGASU, 2015, Iss. 18, pp. 103–107. (In Russian).

11. Romanov A.A., Evdokimov S.V. Results of study of vibrations of concrete parts of sections of Zhigulevskaya HPP. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific review], 2015, no. 7, pp. 188–194. (in Russian)

12. Romanov A.A., Evdokimov S.V., Seliverstov V.A. Studies of fluctuations in the roof of the Zhigulevskaya hydroelectric power station. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific review], 2015, no. 14, pp. 109–112. (in Russian)

13. Balzannikov M.I., Zubkov V.A., Kondratyeva N.V., Khurtin V.A. Comprehensive

examination of the technical condition of building structures of the Zhigulevskaya hydroelectric power station. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical construction], 2013, no. 6, pp. 21–27. (in Russian)

14. Seliverstov V.A. Results of studies of water intake device of hydropower plant using “ANSYS” program. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU* [Scientific and technical statements of SPbGPU], 2009, no. 89–2, pp. 149–153. (in Russian)

15. Balzannikov M.I., Seliverstov V.A. Studies of the influence of flow separators for use in water intake devices of hydropower plants. *Vestnik SamGTU. Seriya «Tehnicheskie nauki»* [Vestnik SamGTU. Technical Sciences Series], 2009, no. 3(25), pp. 199–205. (in Russian)

16. Svitla F., Galitskova Yu.M. Use of hydraulic power units with an inclined axis for small hydroelectric power plants. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific review], 2014, no. 10(2), pp. 450–456. (in Russian)

17. Elistratov V.V., Balzannikov M.I. Hydraulic studies of the water outlet of a large pumping station. *Sbornik nauch. tr. Leningradskogo politehn. in-ta.* [Collection scientific. tr. Leningrad Polytechnic. in-ta.], 1986, no. 415, pp. 30–33. (In Russian).

18. Vasiliev Y.S., Kubyshev L.I. On the technology of designing hydropower facilities. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical construction], 2014, no. 7, pp. 2–8. (in Russian)

Об авторе:

ЕВДОКИМОВ Сергей Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой природоохранного
и гидротехнического строительства
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: sali5@mail.ru

EVDOKIMOV Sergey V.

PhD in of Engineering Sciences, Associate Professor,
Head of the Nature Protection and Hydrotechnical
Construction Chair
Samara State Technical University
Academy of Architecture and Civil Engineering
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya, 244
E-mail: sali5@mail.ru

Для цитирования: Евдокимов С.В. Анализ результатов исследования вибраций несущей конструкции затворов водосбросных сооружений в период эксплуатации ГЭС // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13, № 3. С. 4–12. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.03.01.

For citation: Evdokimov S.V. Analysis of the results of the study of vibrations the supporting structure of the gates of spillway structures during the operation of hydroelectric power plants. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2023, vol. 13, no. 3, pp. 4–12. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2023.03.01.