



С. В. ЕВДОКИМОВ
А. А. РОМАНОВ
Б. Г. ИВАНОВ

ПРОВЕДЕНИЕ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА ЗАТВОРЫ ПЛОТИНЫ

LOCAL STUDIES OF ICE COVER EFFECTS ON DAM GATES

Опыт эксплуатации поверхностных аварийных затворов в условиях ледостава на ряде гидроэлектростанций показал недостаточную эффективность применяемых методов борьбы с обмерзанием конструкций. Правила технической эксплуатации затворов водосливных плотин в зимнее время предусматривают обогрев конструкций по пазам, порогу и обшивке в комплексе с мероприятиями по поддержанию майн перед сооружением. Однако мероприятия по обогреву затворов и устройству майн не всегда достаточно обоснованы и оправданы. В целях получения натуральных данных и научной информации для разработки рекомендаций по режимам эксплуатации и учета при проектировании были проведены натурные исследования напряжений и прогибов в несущих элементах затвора водосливной плотины ГЭС. В данной статье приведены результаты натурных исследований в сравнении с расчетными величинами. В результате исследований получена информация о статической работе плоских затворов в зимних условиях, представляющая теоретический и практический интерес. Материалы могут быть использованы для уточнения правил технической эксплуатации и уточнения нормативных документов на проектирование гидромеханического оборудования на ГЭС.

Ключевые слова: гидромеханическое оборудование ГЭС, плоский затвор, натурные исследования, давление льда, температурный режим, статическая работа

The experience of operation of surface emergency gates in ice-breaking conditions at a number of hydroelectric power plants has shown the insufficient effectiveness of the methods used to combat freezing of structures. The rules for technical operation of spillway dam gates in winter provide for heating of structures by slots, threshold and skin in conjunction with measures to maintain mines before construction. However, measures to heat gates and build mines are not always sufficiently justified and justified. In order to obtain full-scale data and scientific information for the development of recommendations on operating and accounting modes during design, full-scale studies of stresses and deflections in the load-bearing elements of the watershed gate of the hydroelectric power station were carried out. This article presents the results of field studies in comparison with calculated values. As a result of the studies, information on the static operation of flat gates in winter conditions is obtained, which is of theoretical and practical interest. The materials can be used to clarify technical operation rules and to clarify regulatory documents for the design of hydromechanical equipment at hydroelectric power stations.

Keywords: hydromechanical equipment of hydroelectric power station; a flat gate; field studies; ice pressure; temperature mode; static operation

Одним из основных оборудований водоприемной части здания ГЭС является гидромеханическое оборудование, в состав которого

входят затворы, перекрывающие доступ воды в проточную часть гидротурбины. По назначению затворы подразделяются не ремонтные

и аварийно-ремонтные. Аварийные затворы в отличие от ремонтных затворов устанавливаются в текущую воду. Многолетний опыт эксплуатации поверхностных аварийных затворов в условиях ледостава на ряде гидроэлектростанций показал недостаточную эффективность применяемых методов борьбы с обмерзанием конструкций. Исследования в данной области весьма актуальны, особенно в зимний период, когда на поверхности воды образуется ледяной покров. В целях получения натуральных данных и научной информации для разработки рекомендаций по режимам эксплуатации и учета при проектировании гидромеханического оборудования на ГЭС были проведены исследования напряжений и прогибов в несущих элементах затвора водосливной плотины Жигулевской ГЭС в зимнее время [1, 2].

В районе размещения гидроэлектростанции ежегодно выпадает около 90–120 мм зимних осадков. Наличие оттепелей с положительными температурами и ветров со скоростью до 10 м/с способствует постепенному уменьшению высоты снега на льду. Так высота снежного покрова льда в зимний период 2017–2018 гг. в первой декаде декабря достигала 17 см. В конце декабря в результате длительного потепления первичный снег растаял. Вторичный снеговой покров в 2018 г. начал накапливаться с 15 января и сохранился до 5 марта. В зимний период 2018–2019 гг. снег выпал 3 декабря и сохранился до 5 марта. Наибольшая высота снега на льду за эти годы была равна 15 см. Максимальная высота снега для данной зоны за весь период наблюдений составляла 28 см [1].

Ледяной покров на водохранилище обычно устанавливается в ноябре-декабре, за период исследований водохранилище замерзло со 2 по 5 декабря. Наибольшая толщина льда в водохранилище достигала 103 см, а за период проведения исследований максимальная толщина не превышала 70 см. Наибольшая толщина глубинного льда, намерзшего ровным слоем в виде щита на обшивке затвора, составляла 120 см.

В первые дни ледостава в ледяном покрове образуются мелкие температурные трещины, которые в последующем увеличиваются по длине на всю ширину водоема, раскрытие их достигает 50 мм. Наблюдениями отмечались периодические подвижки центрального поля

льда, что вызвало торошение льда по трещинам. В отсеках между быками вследствие температурных деформаций и колебаний уровней воды образуются разломы льда с торосами у боковых граней и в зоне оголовка быка. Характерные размеры толщины льда и высоты снега за период наблюдений на приплотинной части гидроэлектростанции представлены в таблице [1].

Колебания уровней воды способствуют разлому ледяного покрова по контуру быков и затворов. Проектная сработка уровня воды 6 м. Колебания уровней воды у гидроэлектростанции в течение суток значительны, что связано с резким изменением нагрузки.

У водосливной плотины суточные и часовые колебания уровня воды имеют более сглаженный ход и меньшие амплитуды в 20–30 см вследствие распластывания перепада уровней от здания гидроэлектростанции до водосливной плотины на расстоянии почти 3 км. Однако и эти величины с общей сработкой водохранилища способствуют образованию трещин и разломов ледяного покрова перед плотиной, смягчая тем самым воздействие льда на затворы при его температурном расширении.

Правила технической эксплуатации затворов водосливных плотин в зимнее время предусматривают обогрев конструкций по пазам, порогу и обшивке в комплексе с мероприятиями по поддержанию майн перед сооружением. Цель проведения этих мер заключается в следующем:

- 1) исключить примерзание затвора для обеспечения маневренности в случае необходимости;
- 2) снять возможные ледовые нагрузки в связи с полной неопределенностью исходной информации о возможной величине этих нагрузок, что затрудняет их учет при проектировании.

Эти обстоятельства способствовали широкому развитию разработок и проектированию различных мероприятий по борьбе с обмерзанием затворов и ледообразованием перед ними путем устройства майн.

Однако практика показала, что мероприятия по обогреву затворов и устройству майн не всегда достаточно обоснованы и оправданы.

На Жигулевской ГЭС в течение многих лет практиковалось вмерзание некоторых затворов

Толщина льда и высота снежного покрова на приплотинной части гидроузла, см

| Годы | 2014/2015 | | | | 2015/2016 | | | | 2016/2017 | | | | 2017/2018 | | | | 2018/2019 | | | | 2019/2020 | | | |
|----------------------|-----------|----|----|-----|-----------|----|----|-----|-----------|----|----|-----|-----------|---|----|-----|-----------|----|----|-----|-----------|----|----|-----|
| | ХІІ | І | ІІ | ІІІ | ХІІ | І | ІІ | ІІІ | ХІІ | І | ІІ | ІІІ | ХІІ | І | ІІ | ІІІ | ХІІ | І | ІІ | ІІІ | ХІІ | І | ІІ | ІІІ |
| Средняя высота снега | 4 | 18 | 28 | - | 12 | 14 | 20 | - | 4 | 8 | 5 | 2 | 8 | - | - | - | 6 | 6 | 12 | - | - | 10 | 15 | 2 |
| Средняя толщина льда | 11 | 33 | 45 | 48 | 20 | 44 | 59 | 68 | 20 | 45 | 64 | 74 | 16 | - | - | - | 25 | 47 | 65 | 59 | 20 | 43 | 55 | 60 |

в лед, т. е. обеспечивалось проведение зимней консервации затворов [3]. Имеющиеся строительные нормы требовали в сложных ледовых условиях подкреплять расчетные предпосылки данными натурных исследований действия льда на сооружение.

Однако процесс непосредственного измерения давления льда на затворы встречал ряд серьезных трудностей, обусловленных как отсутствием надежных приборов, так и неоднозначным взаимодействием сооружения и примерзшего к нему ледяного покрова при температурных деформациях и колебаниях уровня воды. Приборы, устанавливаемые в различных точках в поле льда перед затворами, дают большой разброс показаний, что затрудняет получение объективного представления о распределении нагрузок по ширине пролета и высоте затвора [4].

Объективно оценить давление льда на сооружение по измеренным напряжениям в поле льда возможно лишь с учетом предварительного напряженного состояния ледяного покрова. Месдозы в поле льда, работающие только на сжатие, фиксируют повышение давления (сжатия) равно как при понижении, так и при повышении температуры льда с момента начала распора ледяного покрова в чаше водоема после закрытия всех трещин.

При установке приборов в обшивку затвора сказывается взаимодействие затвора и ледяного щита (глубинного льда) при температурных деформациях затвора, искажающее истинное представление о давлении ледяного поля. С учетом сказанного, в проведенных натурных исследованиях наибольшее внимание было уделено напряжениям и прогибам несущим конструкциям затвора и их колебаниям под влиянием изменяющихся факторов воздействия [5].

Натурные измерения напряжений проводились на затворе № 28 с помощью струнных накладных тензометров ТН-150, давления льда на обшивку затвора – датчиками давления ГД-6. Прогибы ригелей фиксировались с помощью натянутых струн в пролете затвора и механических самописцев.

Натурные исследования показали, что решающее значение в образовании давления льда на затворы имеют температурные деформации льда. Наибольшие составляющие напряжений в ригелях от воздействия льда и температурных деформаций конструкций в условиях полного вмерзания в лед (без майн и обогрева) достигали 750 кгс/см^2 (нижний ригель); суммарные измеренные напряжения – 1450 кгс/см^2 , расчетные – 2100 кгс/см^2 .

Максимальные измеренные прогибы ригелей достигали 15 мм (нижний ригель при уров-

не 1,5 м ниже отметки НПУ), расчетные – 37,5 мм (при отметке НПУ). Фактические прогибы в зимний период были ниже тарировочных значений на гидростатическую нагрузку вследствие увеличения жесткости конструкции за счет намерзания глубинного льда на обшивке в виде щита, толщина которого достигала 1,2 м.

Проведенные исследования позволили сделать вывод о возможной консервации затворов при выполнении рекомендованного режима сработки уровней, который находится в пределах проектных параметров.

Более подробно остановимся на методике проведенных исследований. Как было отмечено выше, напряжения в несущих элементах затвора измерялись струнными накладными тензометрами ТН-150. Относительная суммарная погрешность по паспортным данным составляла +1 % в диапазоне температур от -30 до $+60$ °С. Прослушивание приборов осуществлялось центральной генераторной станцией типа ЦС-5 с точностью измерения +1 Гц. Отсчеты по приборам снимались дискретно два-три раза в день – утром в 7–8 часов при минимуме и днем в 14–16 часов при максимуме температуры воздуха. Прогибы ригелей фиксировались относительно неподвижной струны, натянутой в пролете. Регистрация показаний осуществлялась механическим самописцем с часовым механизмом.

Температура воздуха измерялась стандартными метеорологическими спиртовыми термометрами с ценой деления $0,2$ °С в те же сроки, что и напряжения. В процессе исследований выполнялись наблюдения за толщиной льда, высотой снега на льду. Фиксировались трещины в ледяном покрове, наличие в них воды и характер разломов ледяного покрова при колебаниях уровня воды.

Температура льда измерялась термометрами сопротивления типа ММТ-4. Показания ледовых термометров снимались мостом постоянного тока типа МВУ-49 в те же сроки, что и напряжения.

На обшивке затвора со стороны верхнего бьефа в пределах глубины 3 м от стабильного осеннего уровня воды были установлены через 0,6 м по высоте пять грунтовых динамометров. Крепление приборов осуществлялось специальной закладной деталью, изготовленной на гидростанции по заказу исследователей, выступавшей из плоскости затвора на 8 см.

Тарировка приборов, установленных на затворе, проводилась осенью и весной гидростатической нагрузкой с помощью ремонтного затвора. По результатам этих тарировок получены стабильные графики зависимости напряжений и прогибов от гидростатической нагрузки,

позволяющие расчетом оценить величину ледовых нагрузок [6–8].

По результатам натурных исследований были сформулированы следующие **выводы и предложения**.

1. Зимний период в районе Жигулевского водохранилища характеризовался средними морозами, которые сменяются оттепелями до 1 °С, весьма незначительным снежным покровом, систематическим суточным колебанием уровня верхнего бьефа с размахом около 30 см и сработкой водохранилища за зиму на 4,0 м. Наибольшие измеренные суммарные напряжения в ригелях составили 450, 1100 и 1450 кгс/см² соответственно в верхнем, среднем и нижнем ригелях [9].

2. Решающее значение в образовании давления льда на затворы имеют термические деформации льда. Натурные исследования показали, что повышение температуры воздуха вызывает увеличение растягивающих напряжений в ригелях. На основании данных наблюдений можно сказать, что наиболее неблагоприятными являются резкие потепления после сильных морозов в малоснежные зимы при относительно стабильном уровне водохранилища. В результате в приплотинной части образуется кристаллический лед без прослоев воды, водно-снегового льда и снега, а сумма отрицательных температур не столь велика, чтобы образовать толстый слой глубинного льда на обшивке затвора, способного воспринимать на себя часть ледовых нагрузок.

3. Максимально измеренные прогибы в среднем и нижнем ригелях составили 14 и 15 мм соответственно при расчетном прогибе 37,5 мм.

4. Вмерзание плоских затворов в лед, т. е. зимняя консервация без обогрева и без поддержания майн перед фронтом сооружения на Жигулевской ГЭС, не является опасным и допускается в пределах проектных и фактических расчетов, наблюдаемых в период работы ГЭС, режимов суточных колебаний уровня воды и сработках водохранилища в период ледостава.

5. В результате исследований получена информация о статической работе плоских затворов в зимних условиях, представляющая теоретический и практический интерес. Материалы могут быть использованы для уточнения правил технической эксплуатации и уточнения нормативных документов на проектирование гидромеханического оборудования на ГЭС.

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. Найденко В.В. Великая Волга на рубеже тысячелетий. От экологического кризиса к устойчивому развитию. Нижний-Новгород: Издательство «Промграфика», 2003. 432 с. Кн. I.

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

6. Евдокимов С.В., Дормидонтова Т.В. Оценка надежности гидротехнических сооружений // Градостроительство и архитектура. 2012. № 1(15). С. 64–68. DOI: 10.17673/Vestnik.2012.01.12.

7. Евдокимов С.В., Дормидонтова Т.В. Критерии оценки надежности и технического состояния гидротехнических сооружений // Градостроительство и архитектура. 2011. № 2(16). С. 105–108. DOI: 10.17673/Vestnik.2011.02.23.

8. Дормидонтова Т.В., Евдокимов С.В. Комплексное применение методов оценки надежности и мониторинга строительных конструкций и сооружений. Самара: СГАСУ, 2012. 128 с.

9. Balzannikov M.I., Rodionov M.V. Extending the operating life of low embankment dams in Russia // International journal on Hydropower and Dams. 2013. № 6. Pp. 60–63.

REFERENCES

1. Romanov A.A. Zhigulevskaya GES. *Ekspluatatsiya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Zhigulevskaya HPP. Operation of hydraulic structures]. Samara, Publishing House «Agni», 2010. 360 p.

2. Romanov A.A. *Kuibyshev gidroelektricheskii kompleks. Istoriya i zhizn'* [Kuibyshev hydroelectric complex. History and life]. Samara, Art-Light, 2018. 272 p.

3. *Tekhnicheskii otchet o proektirovanii i stroitel'stve Volzhskoy GES imeni V.I. Lenina* [Technical report on the design and construction of the Volzhskaya HPP named after V. I. Lenin]. 1950–1958.

4. Naydenko V.V. *Velikaya Volga na rubezhe tysyachel'nykh vekov. Ot ekologicheskogo krizisa k ustoychivomu razvitiyu* [The Great Volga at the turn of the millennium. From environmental crisis to sustainable development]. Nizhny Novgorod, Promgrafika, 2003. 432 p.

5. Bal'zannikov M.I., Zubkov V.A., Kondrat'eva N.V., Khurtin V.A. Comprehensive survey of the technical condition of the building structures of the Zhigulevskaya HPP structures. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic engineering construction], 2013, no. 6, pp. 21–27. (in Russian)

6. Evdokimov S.V., Dormidontova T.V. Assessment of the reliability of hydraulic structures. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2012, no. 1(15), pp. 64–68. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2012.01.12.

7. Evdokimov S.V., Dormidontova T.V. Criteria for assessing the reliability and technical condition of hydraulic structures. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2011, no. 2(16), pp. 105–108. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2011.02.23.

8. Dormidontova T.V., Evdokimov S.V. *Kompleksnoe primeneniye metodov otsenki nadezhnosti i monitoringa stroitel'nykh konstruksiy i sooruzheniy* [Comprehensive application of methods for assessing the reliability and monitoring of building structures and structures]. Samara, SGASU, 2012. 128 p.

9. Balzannikov M.I., Rodionov M.V. Extending the operating life of low embankment dams in Russia. *Mezhdunarodnyy zhurnal po gidroenergetike i plotinam* [International journal on Hydropower and Dams], 2013, no. 6, pp. 60–63. (in Russian)

Об авторах:

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 Engineering Science, Associate Professor, Head of the Nature Protection and Hydrotechnical Engineering Chair

Samara State Technical University
Academy of Architecture and Civil Engineering
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: sali5@mail.ru

РОМАНОВ Алексей Александрович

кандидат технических наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехники

Тольяттинский государственный университет
445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14
E-mail: romanovaa@mail.ru

ROMANOV Alexey A.

PhD in Engineering Science, Professor of the Electrical Equipment and Electrical Engineering Chair

Togliatti State University
445020, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya str., 14
E-mail: romanovaa@mail.ru

ИВАНОВ Борис Георгиевич

доктор технических наук, профессор

Самарский государственный университет путей сообщения

443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2 В
E-mail: bgivanov@mail.ru

IVANOV Boris G.

Doctor, Professor

Samara State Transport University
443066, Samara, Svobody str., 2 B

E-mail: bgivanov@mail.ru

Для цитирования: *Евдокимов С.В., Романов А.А., Иванов Б.Г.* Проведение натурных исследований воздействия ледяного покрова на затворы плотины // Градостроительство и архитектура. 2021. Т.11, № 2. С. 62–66. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.02.10.

For citation: *Evdokimov S.V., Romanov A.A., Ivanov B.G.* Local Studies of Ice Cover Effects on Dam Gates. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2021, vol. 11, no. 2, Pp. 62–66. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2021.02.10.