

УДК 627.8.012.44.001.5

С.Е. ЛИСИЧКИН, О.Д. РУБИН, С.В. ЮРЬЕВ

**КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ПРИКОНТАКТНОЙ ЗОНЫ  
ОСНОВАНИЯ БЕТОННОЙ ПЛОТИНЫ  
ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Сооружения напорного фронта Богучанской ГЭС, возводимой на р. Ангаре, включают бетонную гравитационную плотину. В период затянувшегося строительства разуплотненное скальное основание длительное время подвергалось воздействию окружающей среды в суровых климатических условиях. Приконтактный слой основания частично потерял проектные физико-механические характеристики. Известно, что от свойств приконтактного слоя в значительной мере зависит устойчивость плотины. Материалы статьи посвящены натурным наблюдениям за состоянием приконтактного слоя скального основания и контакта подошвы бетонной плотины со скальным основанием. На основе анализа данных натурных наблюдений были определены модули деформации приконтактных слоев основания, имеющие значения ниже проектных. Результаты аналитических исследований были подтверждены численными методами на основе конечно-элементных моделей. Натурные наблюдения за 2015–2019 гг. показали, что все установленные в основании приборы фиксировали деформации вертикального сжатия контактной области. В феврале 2019 г. при проектной отметке воды в водохранилище 208,0 м долериты основания со стороны верхней грани бетонной плотины оставались в состоянии вертикального сжатия, контактный шов был закрытым, что обеспечивало устойчивость плотины.

К л ю ч е в ы е с л о в а: бетонная плотина, скальное основание, контрольно-измерительные приборы, критерии безопасности, натурные наблюдения.

DOI 10.32683/0536-1052-2019-724-4-74-81

Богучанская ГЭС, расположенная на р. Ангаре в Красноярском крае, входит в Ангарский каскад ГЭС, являясь его четвертой нижней ступенью. Проектная мощность станции составляет 3000 МВт.

Сооружения напорного фронта Богучанской ГЭС протяженностью 2670,5 м включают бетонную гравитационную плотину наибольшей высотой 96 м и протяженностью 809,3 м и каменно-набросную плотину максимальной высотой 80 м и длиной 1861,3 м. Строительство сооружений велось с 1979 г. в суровых климатических условиях при температурных перепадах, достигавших в течение года 98 °С. В апреле 2012 г. началось первоначальное наполнение Богучанского водохранилища до отметки 185,00 м. В середине 2015 г. уровень воды в верхнем бьефе достиг проектной отметки 208,00 м. В декабре 2017 г. завершены все строительно-монтажные работы и гидроэлектростанция введена в промышленную эксплуатацию.

Согласно «Декларации безопасности ГТС Богучанской ГЭС» в состав диагностических показателей состояния бетонной плотины Богучанской ГЭС входят количественные диагностические (получаемые с помощью технических средств и вычисляемые на основе измерений) показатели напряженно-деформированного состояния системы «бетонная плотина –

© Лисичкин С.Е., Рубин О.Д., Юрьев С.В., 2019

основание», с помощью которых осуществляется контроль устойчивости бетонной плотины, так как она обеспечивается при воздействии вертикальных сжимающих напряжений на контакте подошвы плотины с основанием (особенно в верховой части плотины) [1, 2].

Натурные наблюдения за состоянием основания бетонной плотины и анализ их результатов выполняются по 271 прибору дистанционной струнной контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), установленному в основании I и III столбов секций бетонной плотины в секциях бетонной плотины.

Со стороны верховой и низовой граней плотины приборы размещены в створных секциях № 12, 21, 28, 31, 34. В остальных секциях закладная дистанционная КИА устанавливалась только со стороны верховой грани плотины. В качестве примера на рис. 1 представлено размещение КИА в основании секции № 28 бетонной плотины Богучанской ГЭС.

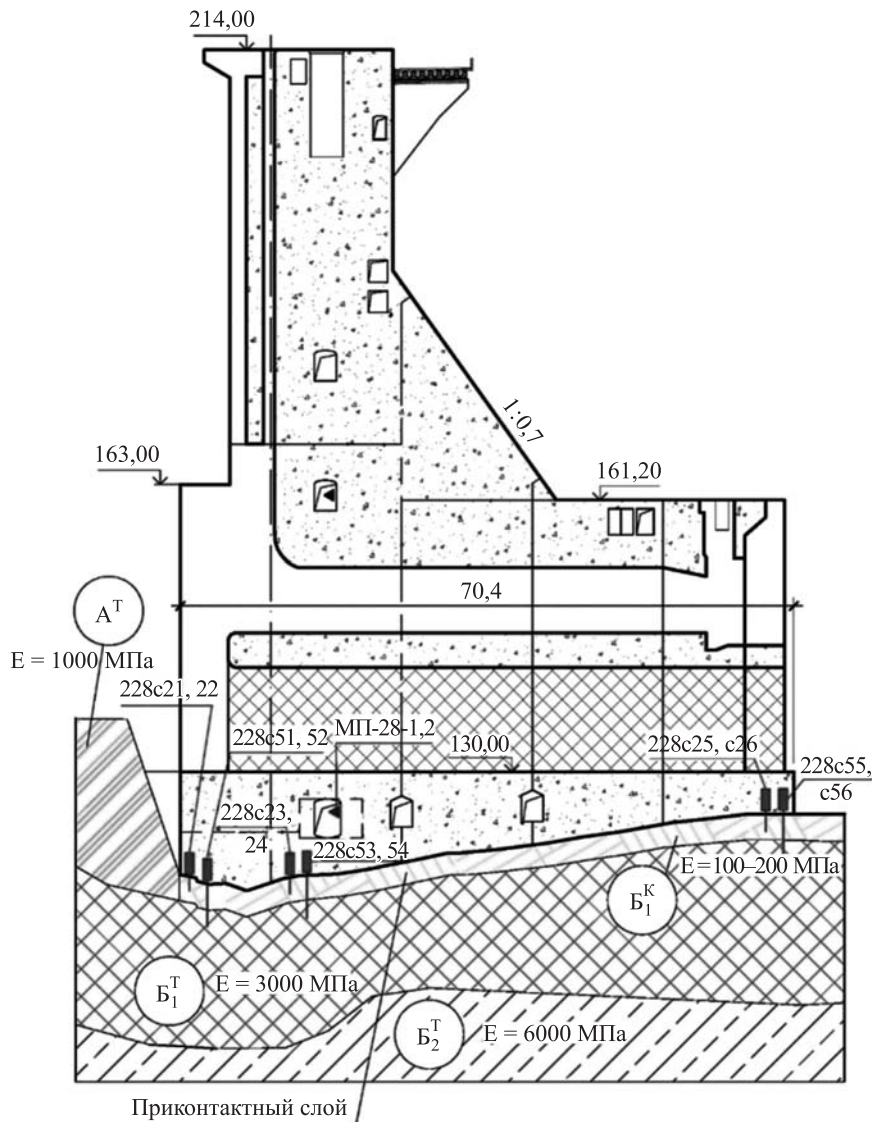


Рис. 1. Размещение КИА в основании секции № 28 бетонной плотины

Вертикальные перемещения поверхностной зоны основания плотины на глубину 2, 5, 15 м измеряются струнными датчиками перемещений ПЛПС-10 с удлинителями, заложенными в скважинах скального массива перед укладкой бетона в секции плотины. В тех же скважинах также установлены датчики температуры ПТС [3–5].

Натурные наблюдения включают сбор данных от внешних воздействий на основание сооружения и измерения диагностических показателей состояния основания бетонной плотины [6]. Анализ результатов натурных наблюдений за состоянием основания бетонных сооружений Богучанской ГЭС осуществляет служба эксплуатации гидроузла с привлечением специализированных организаций.

С подъемом водохранилища температурный режим основания начал резко изменяться в сторону повышения температур и увеличения амплитуды колебаний за счет влияния положительной температуры воды в водохранилище. В 2015–2019 гг. наблюдается как общая стабилизация температуры в пределах 1–5 °С по фронту плотины, так и уменьшение амплитуды колебаний, связанное со стабилизацией температурного режима в придонном слое воды в водохранилище.

Вертикальные перемещения 2-метровой приконтактной зоны основания за весь период наблюдений составили 1,91–7,02 мм; 5-метровой – 2,77–8,77 мм. Полная осадка секций бетонной плотины произошла до 28,5 мм. Результаты натурных наблюдений за вертикальными перемещениями 2- и 5-метровых зон основания представлены в таблице.

**Текущие значения вертикальных перемещений 2- и 5-метровой приконтактной зоны основания 28.02.2019 г.**

Секция, №	Проектный номер прибора	Текущее значение, мм
1	2	3
Деформометры с базой 2 м		
10	210с21	–3,36
12	212с21	–5,27
13	213с21	–4,88
15	215с21	–4,22
16	216с21	–1,91
18	218с21	–6,98
20	220с21	–3,65
21	221с21	–5,94
21	221с22	–6,44
21	221с23	–7,02
23	223с21	–5,87
24	224с21	–5,08
25	225с21	–3,02
27	227с21	–4,17
28	228с21	–4,11

Окончание таблицы

1	2	3
28	228с23	-2,44
31	231с22	-3,28
32	232с21	-2,51
33	233с21	-4,74
34	234с22	-5,27
Деформометры с базой 5 м		
12	212с51	-8,03
13	213с51	-7,11
17	217с51	-8,58
18	218с51	-8,77
20	220с51	-5,98
28	228с53	-2,77
31	231с52	-7,33
32	232с51	-3,07
33	233с51	-8,34
34	234с51	-5,71

В качестве примера на рис. 2 приведены графики вертикальных перемещений 2- и 5-метровых приконтактных зон основания секции № 12.

Анализ данных строительного периода показал наличие более деформируемого прослоя на контакте подошвы бетонной плотины с основанием. Модуль деформации поверхностной области составил 2012,0 МПа, активной области – 6013,0–10 644,0 МПа. При этом деформационная неоднородность основания не привела к трещинообразованию в бетоне тела плотины [6]. Определение фактических значений модуля деформаций основания секции бетонной плотины Богучанской ГЭС проводилось также численными методами на основе конечно-элементных моделей, которые показали близкие по значениям результаты [7–10].

В период 2015–2019 гг. наиболее важным представлялась оценка состояния контактного шва «бетон–скальное основание» со стороны верховой грани плотины, так как устойчивость бетонной плотины обеспечивается при плотно закрытом контактном шве под действием вертикальных сжимающих напряжений. При раскрытии же контактного шва «бетон–скальное основание», сопровождающемся действием противодействия воды в раскрывшемся шве, направленном вверх, устойчивость бетонной плотины, наоборот, может не обеспечиваться, так как уменьшается сопротивление контакта «бетон – скальное основание» сдвигу при снижении его обжатия. Данные наблюдения в этот период свидетельствовали о продолжающихся деформациях основания. При этом все приборы фиксировали деформации вертикального сжатия контактной области, которое стало уменьшаться при наполнении водохранилища.

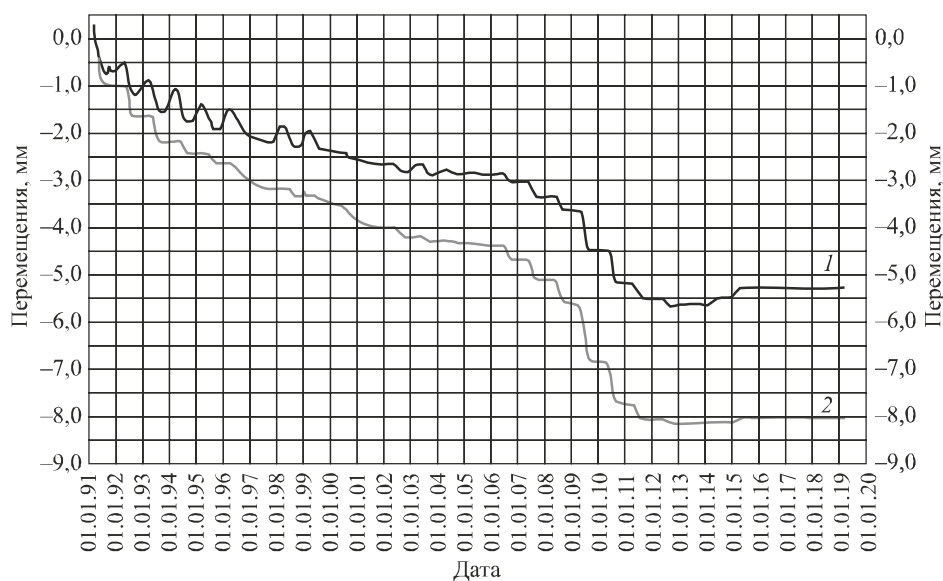


Рис. 2. Графики вертикальных перемещений приконтактной зоны основания под столбом 1 секции 12 на расстоянии 1,5 м от межсекционного шва 12/13  
1 – деформометр 212с21 с базой 2 м; 1,1 м от ВГ; 2 – деформометр 212с51 с базой 5 м; 2,1 м от ВГ

В феврале 2019 г. при отметке воды в водохранилище 208,0 м долериты основания со стороны верховой грани бетонной плотины оставались в состоянии вертикального сжатия, контактный шов был закрытым и, следовательно, устойчивость плотины обеспечивалась.

**Заключение.** Анализ данных натуральных наблюдений подтвердил устойчивость секций бетонной плотины Богучанской ГЭС. Однако необходимы более детальные наблюдения в целях обеспечения безопасности бетонной плотины Богучанской ГЭС.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калустян Э.С. Геомеханика в плотиностроении. М.: Энергоатомиздат, 2008. 224 с.
2. Калустян Э.С. Плотиностроение и геомеханика. М.: Радис-РРЛ, 2012. 152 с.
3. Калустян Э.С., Гребенщиков В.П. Современное состояние основания бетонной плотины Богучанской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2005. № 8. С. 31–38.
4. Рубин О.Д., Волынчиков А.Н., Воробьев А.Л. и др. Особенности состояния бетонных сооружений Богучанской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2007. №11. С. 26–30.
5. Вавилова В.К., Юрьев С.В. Обеспечение надежности бетонной плотины Богучанской ГЭС на основе контроля состояния контактного шва со стороны верховой грани // Вестн. МГСУ. 2013. № 7. С. 157–167.
6. Юрьев С.В. Состояние основания бетонной плотины по данным натуральных наблюдений в суровых климатических условиях // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ». СПб., 2013. С. 312–318.

7. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е. Исследование физико-механических свойств скального основания бетонных сооружений Богучанской ГЭС на основе математических моделей «строящееся бетонное сооружение – скальное основание» // Материалы международной научно-практической конференции «Роль мелиорации и водного хозяйства в реализации национальных проектов». Ч. 2. М., 2008. С. 145–148.
8. Шестопалов П.В. Расчетные исследования для уточнения физико-механических характеристик скального основания на основе данных натурных наблюдений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2013. № 1. С. 66–73.
9. Шестопалов П.В. Совершенствование методики расчетного уточнения физико-механических характеристик скальных и нескальных оснований гидротехнических сооружений на основе конечно-элементных моделей с учетом натурных данных // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2013. № 4. С. 33–40.
10. Шестопалов П.В. Расчетное определение физико-механических характеристик скального основания секции № 28 бетонной плотины Богучанской ГЭС // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 1. С. 77–80.

**Лисичкин Сергей Евгеньевич**, д-р техн. наук

Инженерный центр сооружений, конструкций и технологий в энергетике, г. Москва

**Рубин Олег Дмитриевич**, д-р техн. наук

Институт «Гидропроект» – «НИИЭС», г. Москва

**Юрьев Сергей Владимирович**, инж.

Институт «Гидропроект», г. Москва

Получено 29.03.19

**Lisichkin Sergey Evgenievich**, DSc

Engineering Center of Structures, Constructions and Technologies in Energy, Moscow, Russia

**Rubin Oleg Dmitrievich**, DSc

Institute “Hydroproject” – “NIIES”, Moscow, Russia

**Yuryev Sergey Vladimirovich**, Engineer

Institute “Hydroproject”, Moscow, Russia

## **STATUS CONTROL OF THE NEAR-CONTACT ZONE OF THE BASE OF A CONCRETE DAM ON THE BASIS OF THE FIELD OBSERVATION DATA**

The construction of the pressure front of the Boguchanskaya HPP, being built on the Angara River, includes a concrete gravity dam. During the period of prolonged construction, the decomposed rock foundation was exposed to the environment for a long time in severe climatic conditions. The contact layer of the base has partially lost the design physical and mechanical characteristics. It is known that the stability of the dam largely depends on the properties of the near-contact layer.

The materials of the article are devoted to field observations of the state of the near-contact layer of the rock foundation and the state of contact between the bottom of the concrete dam and the rock foundation. Based on the analysis of field observations, the deformation moduli of the near-contact base layers were determined, having values lower than the design ones. The results of analytical studies were confirmed by numerical studies based on finite element models. Results of field observations (2015–2019) showed that all the instruments installed at the base fixed the deformations of the vertical compression of the



contact area. In February 2019, at the design water level in the reservoir of 208,0 m, the base dolerites from the upstream side of the concrete dam remained in a state of vertical compression, the contact seam remained closed and, therefore, the dam stability was ensured.

**Key words:** concrete dam, rock foundation, instrumentation, safety criteria, field observations.

#### REFERENCES

1. Kalustyan E.S. Geomekhanika v plotinostroyenii [Geomechanics in dam construction]. Moscow, Energoatomizdat, 2008. 224 p. (in Russian)
2. Kalustyan E.S. Plotinostroyeniye i geomekhanika [Dam building and geomechanics]. M.: Moscow, Radis-RRL, 2012. 152 p. (in Russian)
3. Kalustyan E.S., Grebenshchikov V.P. Sovremennoye sostoyaniye osnovaniya betonnoy plotiny Boguchanskoy GES [The current state of the foundation of the Boguchanskaya HPP concrete dam]. Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]. 2005. No. 8. Pp. 31–38. (in Russian)
4. Rubin O.D., Volynchikov A.N., Vorob'yev A.L. etc. Osobennosti sostoyaniya betonnykh sooruzheniy Boguchanskoy GES [Peculiarities of the state of Boguchanskaya HPP concrete structures]. Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]. 2007. No. 11. Pp. 26–30. (in Russian)
5. Vavilova V.K., Yur'yev S.V. Obespecheniye nadezhnosti betonnoy plotiny Boguchanskoy GES na osnove kontrolya sostoyaniya kontaktnogo shva so storony verkhovoy grani [Ensuring the reliability of the concrete dam of the Boguchanskaya HPP on the basis of monitoring the state of the contact seam from the upstream side]. Vestnik MGSU [Scientific and Engineering Journal for Construction and Architecture]. 2013. No. 7. Pp. 157–167. (in Russian)
6. Yur'yev S.V. Sostoyaniye osnovaniya betonnoy plotiny po dannym naturnykh nablyudeniy v surovyykh klimaticheskikh usloviyakh [The condition of the of a concrete dam foundation according to field observations in harsh climatic conditions]. Sbornik dokladov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Collection of reports of the All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation “Monitoring of natural and man-made processes in mining”]. St. Petersburg, 2013. Pp. 312–318. (in Russian)
7. Rubin O.D., Lisichkin S.Ye. Issledovaniye fiziko-mekhanicheskikh svoystv skal'nogo osnovaniya betonnykh sooruzheniy Boguchanskoy GES na osnove matematicheskikh modeley “stroyashcheyesya betonnoye sooruzheniye – skal'noye osnovaniye” [The study of the physical and mechanical properties of rock foundation of Boguchanskaya HPP concrete structures based on mathematical models of the “concrete structure under construction – rock foundation”]. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Rol'melioratsii i vodnogo khozyaystva v realizatsii natsional'nykh proektov”. Ch. 2 [Proceedings of the international scientific-practical conference “The role of land reclamation and water management in the implementation of national projects”. P. 2]. Moscow, 2008. Pp. 145–148. (in Russian)
8. Shestopalov P.V. Raschetnye issledovaniya dlya utochneniya fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik skal'nogo osnovaniya na osnove dannykh naturnykh nablyudeniy [Computational studies to clarify the physicommechanical characteristics of the rock base on the basis of field observations data]. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]. 2013. No. 1. Pp. 66–73. (in Russian)

9. Shestopalov P.V. Sovershenstvovaniye metodiki raschetnogo utochneniya fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik skal'nykh i neskal'nykh osnovaniy gidrotekhnicheskikh sooruzheniy na osnove konechno-elementnykh modeley s uchedom naturnykh dannykh [Improving the method of calculating the refinement of the physico-mechanical characteristics of the rocky and non-rocky foundations of hydraulic structures based on finite element models taking into account field data]. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]. 2013. No. 4. Pp. 33–40. (in Russian)
  10. Shestopalov P.V. Raschetnoye opredeleniye fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik skal'nogo osnovaniya seksii No. 28 betonnoy plotiny Boguchanskoy GES [Estimated determination of the physico-mechanical characteristics of the rock foundation of section No. 28 of Boguchanskaya HPP concrete dam]. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]. 2016. No. 1. Pp. 77–80. (in Russian)
-