

DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-4-307-316
УДК 627.824

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Анализ данных натуральных наблюдений за деформациями основания и полными осадками бетонной плотины Богучанской ГЭС

С.В. Юрьев

АО «Институт „Гидропроект“, Москва, Российская Федерация

✉ yuriev@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 25 мая 2022 г.

Доработана: 17 августа 2022 г.

Принята к публикации: 17 августа 2022 г.

Аннотация. Представлены результаты анализа данных комплексных натуральных исследований вертикальных деформаций приконтактного слоя скального основания и полных осадок секций бетонной плотины Богучанской ГЭС в целях определения состояния контакта подошвы бетонной плотины со скальным основанием. Цель исследования заключается в контроле состояния контакта подошвы бетонной плотины с основанием посредством анализа комплекса натуральных наблюдений за вертикальными деформациями приконтактной зоны основания секций бетонной плотины и полными осадками секций бетонной плотины для обоснования устойчивости секций бетонной плотины. В целях контроля вертикальных деформаций приконтактной зоны скального основания установлена струнная контрольно-измерительная аппаратура (датчики перемещений ПЛПС-10). Полные осадки секций бетонной плотины измеряются с помощью потолочных марок, установленных в цементационной галерее. Анализ натуральных данных о полных осадках секций бетонной плотины и вертикальных деформациях приконтактного участка скального основания показал, что контактный шов между подошвой секций бетонной плотины и основанием находится в условиях вертикального сжатия. Результаты анализа имеющихся данных комплексных исследований вертикальных деформаций приконтактного слоя скального основания и полных осадок секций бетонной плотины позволили обосновать устойчивость секций бетонной плотины.

Ключевые слова: бетонная плотина, скальное основание, приконтактная зона, контрольно-измерительные приборы, данные, натурные наблюдения, полные осадки, вертикальные деформации, устойчивость, секции, бетонная плотина

Для цитирования

Юрьев С.В. Анализ данных натуральных наблюдений за деформациями основания и полными осадками бетонной плотины Богучанской ГЭС // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 4. С. 307–316. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-4-307-316>

Analysis of the field studies of the foundation deformations and total draft of the Boguchansk HPP concrete dam

Sergey V. Yuriev

Institute “Hydroproject,” JSC, Moscow, Russian Federation

✉ yuriev@mail.ru

Article history

Received: May 25, 2022

Revised: August 17, 2022

Accepted: August 17, 2022

Abstract. The results of data analysis from complex field studies of vertical deformations of the rock base near-contact layer and full settling Boguchanskaya HPP concrete dam sections in order to determine the state of contact of the foot of the concrete dam with the rock base are presented. The purpose of the study is to

Юрьев Сергей Владимирович, заместитель главного инженера, АО «Институт „Гидропроект“, Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 2; ORCID: 0000-0002-2609-2711; yuriev@mail.ru

Sergey V. Yuriev, Deputy Chief Engineer, Institute “Hydroproject,” JSC, 2 Volokolamskoye Shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2609-2711; yuriev@mail.ru

© Юрьев С.В., 2022



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

For citation

Yuriev S.V. Analysis of the field studies of the foundation deformations and total draft of the Boguchansk HPP concrete dam. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(4)307–316. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-4-307-316>

control the state of the contact of the concrete dam foot with the foundation based on the analysis of a set of field studies of the vertical deformations of the near-contact zone of the foundation of the concrete dam sections and the total draft of the sections of the concrete dam to justify the stability of the concrete dam sections. In order to control the vertical deformations of the near-contact zone of the rock foundation, string control and measuring equipment (displacement sensors PLPS-10) was installed. The total draft of the concrete dam sections is measured by means of ceiling marks installed in the grout gallery. Analysis of the field data on total drafts of concrete dam sections and vertical deformations of the near-contact section of the rock foundation showed that the contact joint between the foot of the concrete dam sections and the foundation is in vertical compression. The results of the analysis of the available data of complex studies of vertical deformations of the near-contact layer of the rock foundation and the total draft of the concrete dam sections made it possible to substantiate the stability of the concrete dam sections.

Keywords: concrete dam, rock foundation, near-contact zone, instrumentation, field observation data, total draft, vertical deformations, stability, concrete dam, sections

Введение

Богучанская ГЭС проектной мощностью 3000 МВт расположена в Красноярском крае на р. Ангаре, составляя четвертую (нижнюю ступень) Ангарского каскада ГЭС.

Напорный фронт Богучанской ГЭС имеет общую протяженность 2670,5 м и образован бетонной гравитационной и каменно-набросной плотинами. Бетонная плотина имеет протяженность 809,3 м и наибольшую высоту 96 м [1–3].

Район строительства Богучанской ГЭС характеризуется суровыми климатическими условиями, при которых температурные перепады в течение года могут превышать 90 °С. Строительство основных сооружений началось в 1979 г., наполнение водохранилища до отметки первой очереди (185 м) происходило с апреля 2012 г. В середине 2015 г. уровень воды в верхнем бьефе достиг проектной отметки 208,00 м. В декабре 2017 г. Богучанская ГЭС была введена в промышленную эксплуатацию после завершения строительно-монтажных работ [4].

Методы

Натурные наблюдения за состоянием основания бетонной плотины (в том числе вертикальных деформаций приконтактного слоя и полных осадок бетонной плотины) выполняются по приборам дистанционной струнной контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), установленным в основании I и III столбов секций бетонной плотины, а также геодезической КИА (установленным в цементационной галерее верхних столбов секций бетонной плотины). При этом учтен отечественный и зарубежный опыт натурных наблюдений¹ [5; 6].

Вертикальные деформации приконтактного слоя основания бетонной плотины на глубину 2 и 5 м измеряются струнными датчиками перемещений ПЛПС-10 с удлинителями, заложенными в скважинах скального массива перед укладкой бетона в секции плотины.

Полные осадки секций бетонной плотины измеряются на основе геодезических марок, установленных в цементационной галерее (по две марки в каждой секции).

Со стороны верховой и низовой граней плотины приборы ПЛДС-10 размещены в секциях 12, 21, 28, 31, 34, которые называются створными. В остальных секциях закладная дистанционная КИА устанавливалась только со стороны верховой грани плотины (то есть в основании I столба).

В качестве примера на рис. 1 представлено размещение указанной струнной и геодезической КИА в основании секции 12 бетонной плотины Богучанской ГЭС.

Натурные наблюдения за основанием бетонной плотины включают измерения значений диагностических показателей состояния основания бетонной плотины.

Согласно Декларации безопасности ГЭС Богучанской ГЭС, в состав диагностических показателей состояния бетонной плотины Богучанской ГЭС входят количественные диагностические показатели

¹ ICOLD. Bulletin 188. Incident database. 2019.

напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «бетонная плотина – основание», в том числе состояние контактного шва «бетон – скала» (по дистанционным щелемерам ПЛПС с базой 2 и 5 м в основании) (отсутствие раскрытия). При этом критерий К1 соответствует переходу от сжатия контактного шва к растяжению ($K1 \geq 0$), а критерий К2 не назначается.

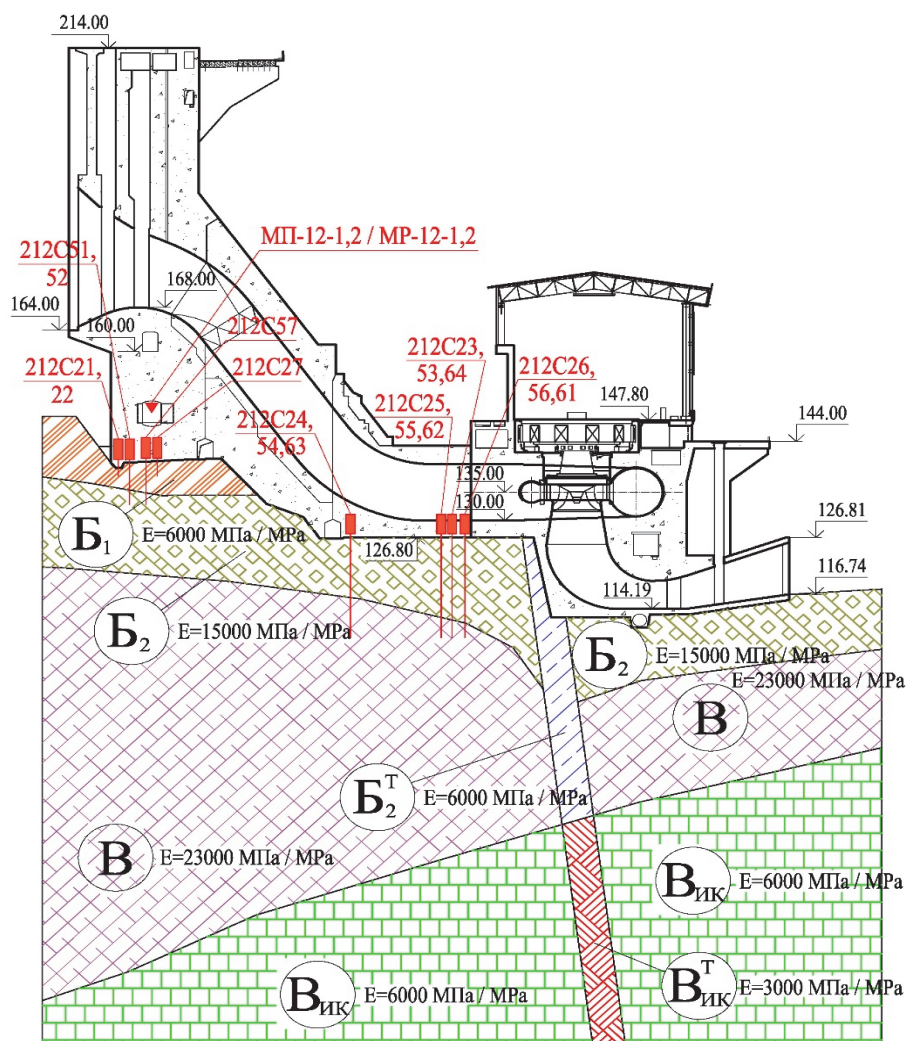


Рис. 1. Размещение струнной и геодезической КИА в основании секции 12 бетонной плотины
Figure 1. String and geodetic instrumentation placement at the base of the section 12 of the concrete dam

Также имеются критерии безопасности, касающиеся полной осадки створных секций бетонной плотины.

Таким образом, на основе анализа данных комплекса натуральных наблюдений осуществляется контроль устойчивости бетонной плотины, так как устойчивость обеспечивается при воздействии вертикальных сжимающих напряжений на контакте подошвы плотины с основанием, то есть имеют место вертикальные деформации сжатия (в особенности в верхней части плотины), что также обосновано значительным объемом исследований состояния контакта бетонных плотин со скальными основаниями [7–17].

Результаты

Анализ данных натуральных наблюдений за вертикальными деформациями приконтактной зоны скального основания показал, что наибольшие деформации сжатия сформировались к началу наполнения водохранилища (в 2012 г.). На первом этапе водохранилище наполнялось до промежуточного уровня 185 м. Под действием взвешивающего влияния воды, наполняющей водохранилище (при уменьшении давления секций бетонной плотины на основание), вертикальные деформации сжатия приконтактной зоны осно-

вания стали уменьшаться. При этом возникло опасение, что в процессе дальнейшего подъема уровня воды в водохранилище до проектной отметки 208 м (к середине 2015 г.) уменьшение сжимающих деформаций может достигнуть такого уровня, что произойдет нарушение контакта подошвы бетонной плотины с основанием (раскрытие контактного шва). При проникновении воды в контактный шов «бетон – скала» могло возникнуть вертикальное усилие на подошву секций бетонной плотины от действия противодействия воды, направленное вверх².

При раскрытии же контактного шва «бетон – скала», сопровождающимся действием противодействия воды в раскрывшемся шве, направленном вверх, устойчивость бетонной плотины могла не обеспечиваться, так как снижается сопротивление контакта «бетон – скала» сдвигу при снижении его обжатия.

Тем не менее данные натурных наблюдений в период подъема водохранилища до проектной отметки (208 м) показали, что все установленные в основании приборы фиксировали деформации вертикального сжатия приконтактной области. При этом с 2016 г. наметилась стабилизация вертикальных деформаций приконтактной области основания.

Вертикальные деформации двухметровой приконтактной зоны основания створных секций 12, 21, 28, 31, 34 к октябрю 2021 г. составили –2,45...–7,02 мм; пятиметровой приконтактной зоны основания –2,69...–8,17 мм.

Результаты натурных наблюдений за вертикальными деформациями двух- и пятиметровых зон основания представлены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Значения вертикальных деформаций двух- и пятиметровых приконтактных зон основания в характерные периоды времени, мм
The vertical deformations values of the two- and five-meter near-contact zones of the base in characteristic periods of time, mm

Секции Sections	№ прибора ПЛПС Instrumentation No.	23.09.2012	11.01.2016	23.09.2019	11.10.2021	База прибора, м Instrument base, m
12	212c21	–5,68	–5,28	–5,24	–5,22	2
21	221c21	–6,23	–5,98	–5,91	–5,90	2
21	221c22	–6,61	–6,44	–6,45	–6,47	2
21	221c23	–7,48	–7,02	–7,02	–7,02	2
28	228c21	–5,56	–4,13	–4,20	–4,26	2
28	228c23	–3,46	–2,45	–2,42	–2,45	2
28	228c24	–3,67	–3,66	–3,66	–3,66	2
31	231c22	–3,31	–3,30	–3,28	–3,28	2
34	234c22	–5,99	–5,34	–5,26	–5,25	2
34	234c23	–6,91	–6,47	–6,45	–6,49	2
12	212c51	–8,15	–8,03	–8,03	–8,03	5
12	212c57	–6,05	–6,08	–6,08	–6,09	5
21	221c51	–8,19	–8,18	–8,18	–8,17	5
28	228c52	–2,72	–2,69	–2,69	–2,69	5
28	228c53	–3,72	–2,80	–2,74	–2,79	5
31	231c52	–7,47	–7,40	–7,28	–7,25	5
34	234c51	–5,98	–5,77	–5,71	–5,68	5

На рис. 2–6 приведены графики вертикальных деформаций двух- и пятиметровых приконтактных зон скального основания секций 12, 21, 28, 31, 34.

² СП 23.13330.2018. Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85. М.: Стандартинформ. 2019. 96 с.; СП 40.13330.2012. Плотины бетонные и железобетонные. Актуализированная редакция СНиП 2.06.06-85. М.: ФАУ «ФЦС». 2012. 65 с.

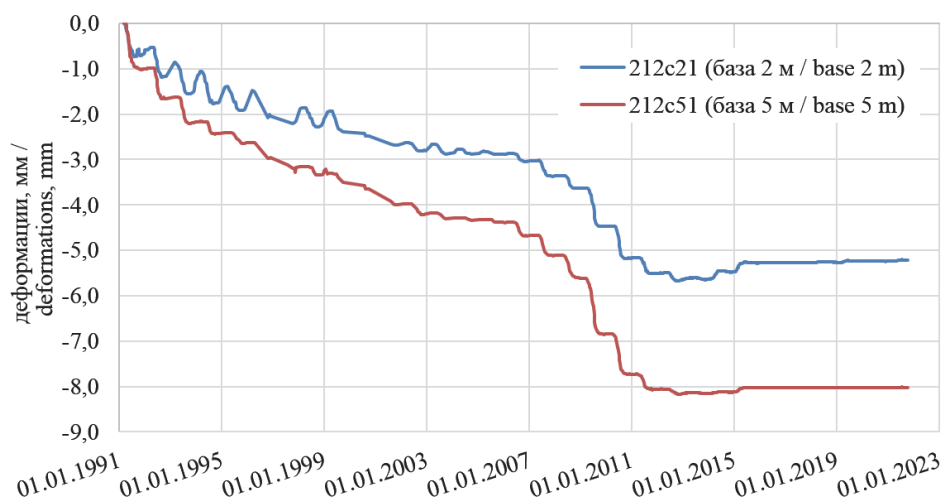


Рис. 2. Вертикальные деформации приконтактной зоны основания секции 12
Figure 2. Vertical deformations of the near-contact zone of the base of section 12

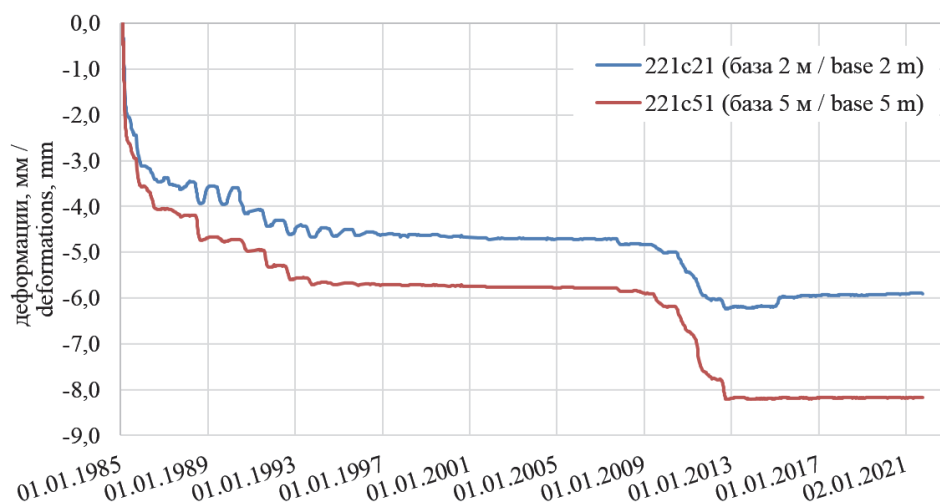


Рис. 3. Вертикальные деформации приконтактной зоны основания секции 21
Figure 3. Vertical deformations of the near-contact zone of the base of section 21

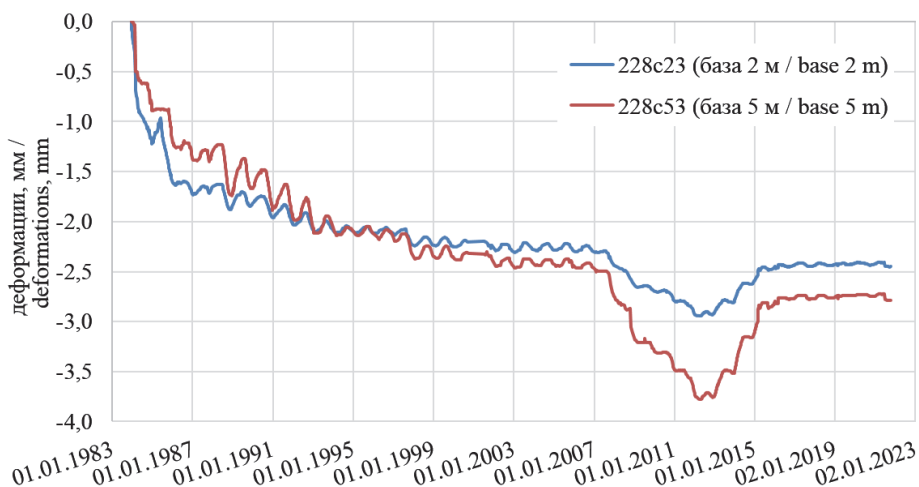


Рис. 4. Вертикальные деформации приконтактной зоны основания секции 28
Figure 4. Vertical deformations of the near-contact zone of the base of section 28

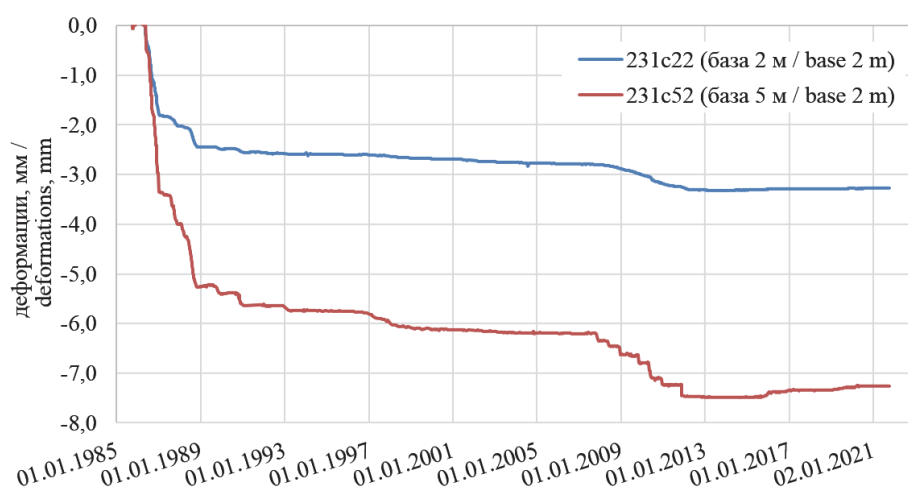


Рис. 5. Вертикальные деформации приконтактной зоны основания секции 31
Figure 5. Vertical deformations of the near-contact zone of the base of section 31

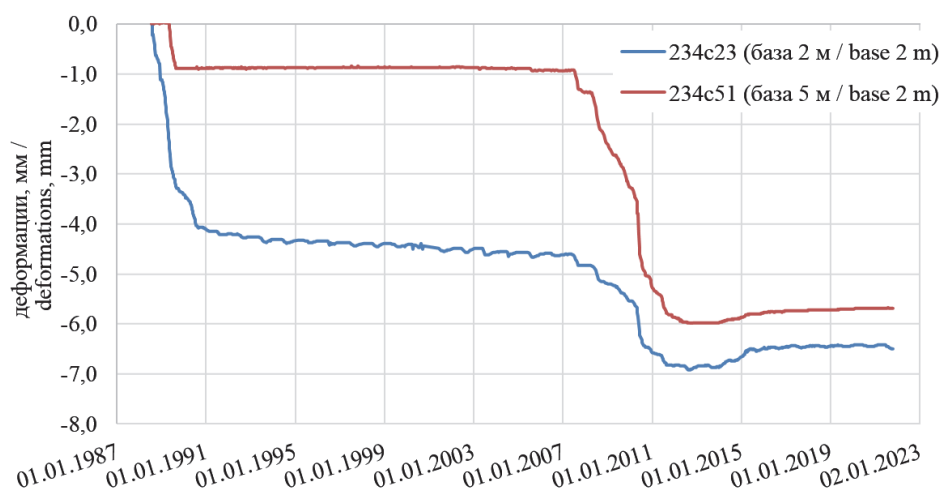


Рис. 6. Вертикальные деформации приконтактной зоны основания секции 34
Figure 6. Vertical deformations of the near-contact zone of the base of section 34

Из представленных графиков следует, что в период интенсивной достройки секций бетонной плотины (2007–2012 гг.) отмечался рост вертикальных деформаций приконтактного слоя скального основания бетонной плотины.

Как отмечалось ранее, величина полной осадки секций бетонной плотины контролируется на основе геодезических марок, установленных в цементационной галерее.

В табл. 2 приведены полные значения осадок створных секций (12, 21, 28, 31, 34) бетонной плотины.

Как показал анализ данных, приведенных в табл. 2, максимальная полная осадка створных секций бетонной плотины составила 55,3 мм (для секции 28 при $K_1 = 70$ мм, $K_2 = 80$ мм), что не превышает критерийные значения.

На рис. 7–11 приведены графики полных осадок (мм) секций 12, 21, 28, 31, 34 бетонной плотины.

Из представленных графиков (рис. 7–11) следует, что в период наполнения водохранилища (2012–2015 гг.) происходил интенсивный рост осадки секций бетонной плотины вследствие возрастающего давления воды в водохранилище на основание. Вместе с тем увеличение полной осадки секций бетонной плотины свидетельствует о передаче вертикальной нагрузки от веса секций плотины на основание (то есть отмечался полный контакт подошвы секций плотины с основанием).

Таким образом, в настоящее время при проектной отметке воды в водохранилище 208,0 м долирты основания со стороны верховой грани бетонной плотины остаются в состоянии вертикального сжатия, контактный шов «бетон – скала» остается закрытым и, следовательно, устойчивость плотины обеспечивается.

Таблица 2 / Table 2

Значения полных осадок секций бетонной плотины по показаниям геодезических марок в характерные периоды времени, мм
 The values of the total settlements of the concrete dam sections according to the geodetic marks indications
 in characteristic periods of time, mm

Секции Sections	№ прибора Instrumentation No.	Сентябрь / September 2012	Февраль / February 2016	Октябрь / October 2019	Декабрь / December 2021
12	МП 12-1	-18,1	-33,1	-34,9	-35,5
12	МП 12-2	-19,8	-35,0	-37,6	-38,1
21	МП 21-1	-26,8	-45,4	-47,2	-47,6
21	МП 21-2	-28,4	-46,7	-48,6	-49,1
28	МП 28-1	-33,3	-52,3	-54,1	-54,5
28	МП 28-2	-33,6	-52,2	-54,9	-55,3
31	МП 31-1	-28,9	-46,1	-48,1	-48,5
31	МП 31-2	-33,2	-50,0	-52,1	-52,5
34	МП 34-1	-12,4	-28,4	-30,6	-30,8

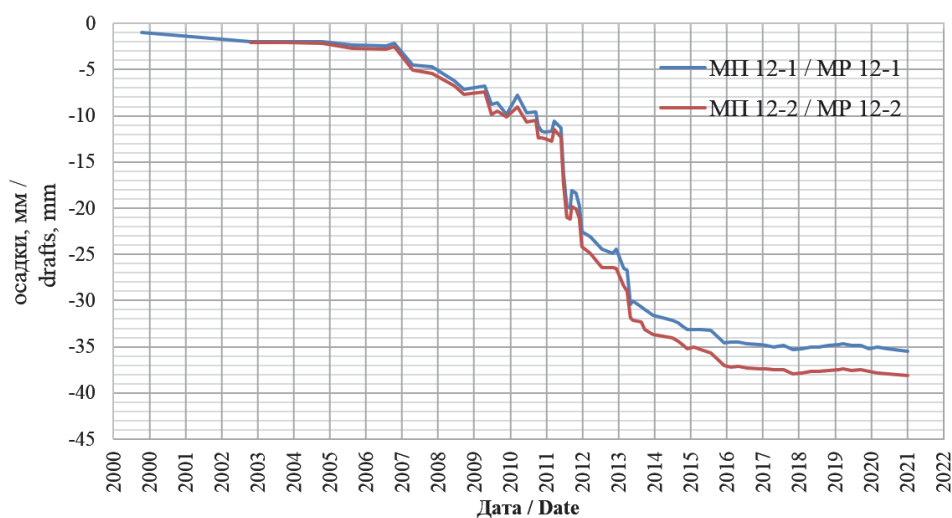


Рис. 7. Графики полных осадок секции 12
 Figure 7. Graphs of total draft of section 12

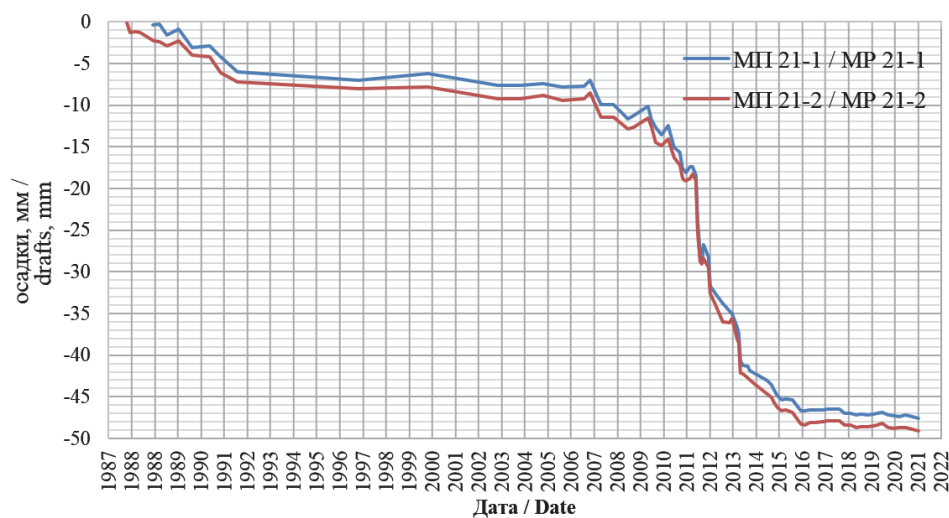


Рис. 8. Графики полных осадок секции 21
 Figure 8. Graphs of total draft of section 21

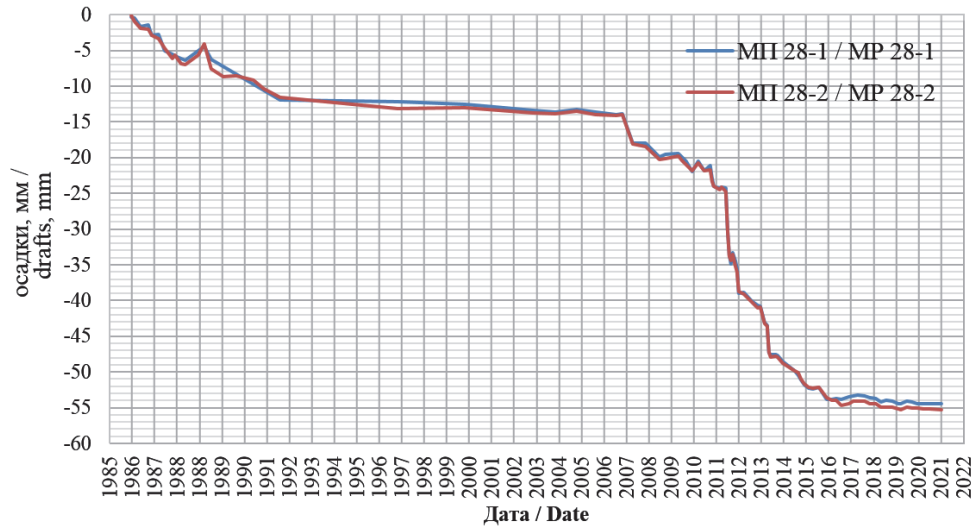


Рис. 9. Графики полных осадок секции 28
Figure 9. Graphs of total draft of section 28

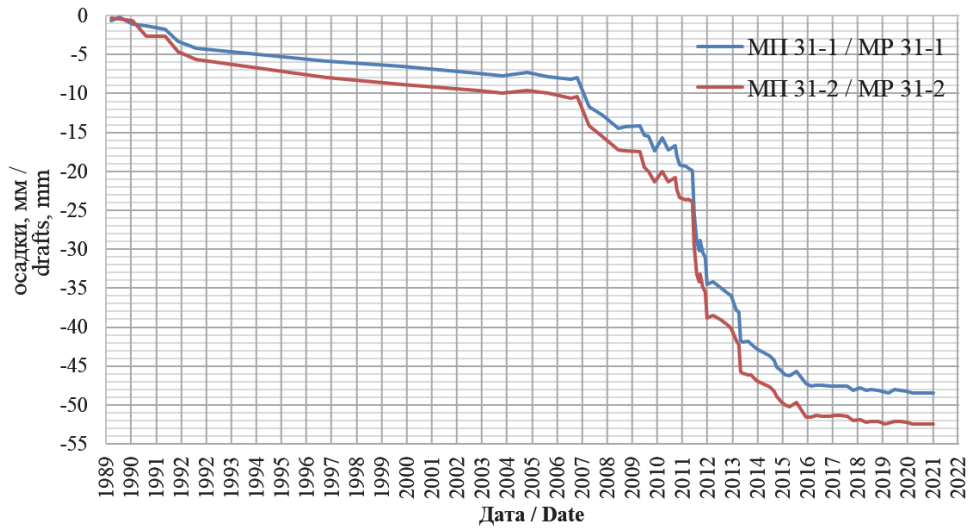


Рис. 10. Графики полных осадок секции 31
Figure 10. Graphs of total draft of section 31

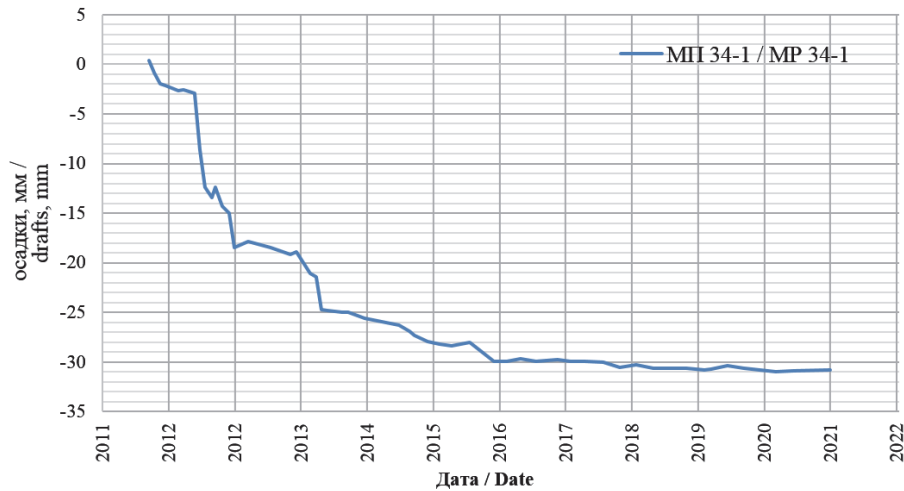


Рис. 11. График полной осадки секции 34
Figure 11. Graphs of total draft of section 34

Заключение

Анализ данных натуральных наблюдений за вертикальными деформациями приконтактного слоя скального основания показал, что наибольшие деформации (–7,48 мм по прибору 221с23 для двухметровой зоны; –8,19 мм по прибору 221с51 для пятиметровой зоны) зафиксированы в 2012 г. перед наполнением водохранилища.

При наполнении водохранилища происходило уменьшение деформаций сжатия приконтактного слоя скального основания. Так, при наполнении водохранилища до проектной отметки 208 м существовало опасение по поводу уменьшения вертикального сжатия контактного шва «бетон – скала», ввиду выталкивающего действия воды, что могло привести к снижению сопротивления контактного шва сдвигу и снижению устойчивости секций бетонной плотины.

Тем не менее к октябрю 2021 г. вертикальные деформации двухметровой приконтактной зоны основания створных секций 12, 21, 28, 31, 34 составили –2,45...–7,02 мм; пятиметровой приконтактной зоны основания –2,69...–8,17 мм. То есть контактный шов «бетон – скала» оставался полностью сжатым и удовлетворял требованиям критериев безопасности.

Вместе с тем данные геодезических наблюдений свидетельствуют, что в период наполнения водохранилища (2012–2015 гг.) и в последующий период полная осадка секций бетонной плотины увеличивалась, что говорит о вертикальной нагрузке от веса секций плотины на основание (то есть отмечался полный контакт подошвы секций плотины с основанием). При этом максимальная величина полной осадки створных секций бетонной плотины составила 55,3 мм (для секции 28 при $K_1 = 70$ мм, $K_2 = 80$ мм), что не превышает критериальные значения.

Таким образом, на основе анализа данных комплексных натуральных наблюдений обоснована устойчивость секций бетонной плотины Богучанской ГЭС.

Список литературы / References

1. Kalustyan E.S. *Geomechanics in dam engineering*. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 2008. (In Russ.)
Калустян Э.С. Геомеханика в плотиностроении. М.: Энергоатомиздат, 2008. 224 с.
2. Vavilova V.K., Yuriev S.V. Ensuring the reliability of Boguchanskaya HPP concrete dam based on the control of the contact joint state from the upper face side. *Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture*. 2013;(7):157–167. (In Russ.)
Вавилова В.К., Юрьев С.В. Обеспечение надежности бетонной плотины Богучанской ГЭС на основе контроля состояния контактного шва со стороны верховой грани // Научно-технический журнал по строительству и архитектуре. 2013. № 7. С. 157–167.
3. Yuriev S.V. The state of the concrete dam foundation according to field observations in harsh climatic conditions. *Monitoring of Natural and Technogenic Processes During Mining: Collection of Reports of the All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation*. St. Petersburg; 2013. p. 312–318. (In Russ.)
Юрьев С.В. Состояние основания бетонной плотины по данным натуральных наблюдений в суровых климатических условиях // Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. СПб., 2013. С. 312–318.
4. Lisichkin S.E., Rubin O.D., Yuriev S.V. Status control of the near-contact zone of the base of a concrete dam on the basis of the field observation data. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2019;(4):74–81. (In Russ.)
Лисичкин С.Е., Рубин О.Д., Юрьев С.В. Контроль состояния приконтактной зоны основания бетонной плотины на основе данных натуральных наблюдений // Известия вузов. Строительство. 2019. № 4 (724). С. 74–81.
5. Wang Sh., Gu Ch., Bao T. Safety Monitoring Index of high concrete gravity dam based on failure mechanism of instability. *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. Article 732325. <https://doi.org/10.1155/2013/732325>
6. Pekhtin V.A., Volinchikov A.N., Mgalobelov Yu.B., Yuriev S.V. Estimation of concrete and rock-fill dam's reliability of Boguchany HPP before first reservoir impoundment. *25th Congress ICOLD*. Stavanger; 2015. p. 265–267.
Пехтин В.А., Волынчиков А.Н., Мгалобелов Ю.Б., Юрьев С.В. Оценка надежности бетонной и каменнонабросной плотин Богучанской ГЭС перед первым наполнением водохранилища до проектной отметки // 25-й Конгресс по большим плотинам. Ставангер, 2015. С. 265–267.
7. Renaud S., Saichi T., Bouaanani N. Roughness Effects on the Shear strength of concrete and rock joints in dams based on experimental data. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019;52:3867–3888.
8. Pereira R., Lopes Batista A., Neves L.C., Lemos J.V. Deduction of ultimate equilibrium limit states for concrete gravity dams keyed into rock mass foundations based on large displacement analysis. *Structures*. 2022;38:1180–1190.
9. Chen S., Gu C., Lin C. Multi-kernel optimized relevance vector machine for probabilistic prediction of concrete dam displacement. *Engineering with Computers*. 2021;37:1943–1959.

10. Li W., Wu W., Zhang J. Numerical stability analysis of the dam foundation under complex geological conditions at great depth: a case study of Kala Hydropower Station, China. *Frontiers in Physics*. 2000;9:808840. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.808840>
11. Dong W., Song S., Zhang B., Yang D. SIF-based fracture criterion of rock-concrete interface and its application to the prediction of cracking paths in gravity dam. *Engineering Fracture Mechanics*. 2019;221:106686. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106686>
12. Bista D., Sas G., Johansson F., Lia L. Roughness influence of location of large-scale asperity on shear strength of concrete-rock interface under eccentric load. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2020;12(3):449–460.
13. Sowab D., Carbajal C., Breul P., Peyras L., Rivard P., Bacconnet C., Ballivy G. Modeling the spatial variability of the shear strength of discontinuities of rock masses: application to a dam rock mass. *Engineering Geology*. 2017;220:133–143. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2017.01.023>
14. Coubard G., Deveze G., Vergniault C., Zammout G., Laugier F., Peyras L., Carvajal C., Bost M., Rajot J., Rivard P., Ballivy G., Sow D., Rullière A., Breul P., Bacconnet C., Quirion M. Best estimation of mechanical properties at the concrete-to-rock interface and at the discontinuities of rock foundations for gravity dams. *26th International Congress on Large Dams, 4–6 July 2018, Vienna, Austria*. Vienna; 2018. Article 4597. <https://doi.org/10.1201/9780429465086-148>
15. Saichi T., Renaud S., Bouaanani N. Progressive Approach to account for large-scale roughness of concrete – rock interface in practical stability analyses for dam safety evaluation. *International Journal of Geomechanics*. 2022;22(8). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002468](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002468)
16. Farinha M.L.B., Azevedo N.M., Candeias M. Small displacement coupled analysis of concrete gravity dam foundations: static and dynamic conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2017;50:439–464. <https://doi.org/10.3390/geotechnics2010006>
17. Farinha M.L.B., Azevedo N.M., Leitão N.A., Rocha de Almeida J., Oliveira S. Sliding stability assessment of concrete dams using a 3D discontinuum hydromechanical model following a discrete crack approach. *Geotechnics*. 2022;2(1):133–157. <https://doi.org/10.3390/geotechnics2010006>