

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-2-48-56>

УДК 627.8:626/627:693.5



АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ И РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ КАМЕННО-НАБРОСНОЙ ПЛОТИНЫ БОГУЧАНСКОЙ ГЭС С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ ЕЕ СОСТОЯНИЯ

Е.Н. Беллендир^{1✉}, О.Д. Рубин^{1,3}, С.В. Юрьев^{1✉}, С.Е. Лисичкин², И.В. Баклыков²

¹АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт Гидропроект им. С.Я. Жука»; 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 2, Россия

²Филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт Гидропроект им. С.Я. Жука» – «НИИ энергетических сооружений»; 125362, г. Москва, Строительный проезд, 7А, Россия

³Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия

Аннотация. Представлены результаты комплексных натурных и расчетных исследований прочности и устойчивости каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС. Цель работы – комплексная оценка состояния каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС, в том числе с прогнозированием ее состояния. Выполнен анализ данных натурных наблюдений, который показал ряд отличий от проектных предпосылок. Анализ данных по осадкам и горизонтальным смещениям марок, установленных на бермах низовой упорной призмы каменно-набросной плотины (КНП) Богучанской ГЭС, показал, что они носят незатухающий характер. На основе разработанной и откалиброванной пространственной, постоянно действующей конечно-элементной модели проведены комплексные расчетные исследования напряженно-деформированного состояния каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС (включая створы, в которых зафиксированы наибольшие осадки и горизонтальные смещения марок, установленных на бермах низовой упорной призмы каменно-набросной плотины) с учетом данных натурных наблюдений, в том числе отклонений от проекта. Расчеты показали, что при фактическом профиле каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС, несколько меньшем, чем по проекту, значение коэффициента запаса устойчивости низового откоса составило 1,32-1,33. Это превышает нормативное значение, равное 1,25. На этапе прогнозирования состояния каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС на период до 2040 г. расчетное значение коэффициента запаса устойчивости низового откоса может составить 1,25, что равняется нормативному значению (то есть запас минимальный). В настоящее время устойчивость низового откоса каменно-набросной плотины обеспечивается несмотря на отклонения фактических размеров профиля каменно-набросной плотины от проектных величин. При дальнейшем росте осадок, а также горизонтальных смещений марок, установленных на бермах низовой упорной призмы, может измениться устойчивость низового откоса каменно-набросной плотины.

Ключевые слова: прочность и устойчивость, расчетные исследования, ГЭС, каменно-набросная плотина, асфальтобетонная диафрагма, осадки и смещения марок, пространственная конечно-элементная модель

Формат цитирования: Беллендир Е.Н., Рубин О.Д., Юрьев С.В., Лисичкин С.Е., Баклыков И.В. Анализ результатов натурных и расчетных исследований прочности и устойчивости каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС с прогнозированием ее состояния // Природообустройство. 2024. № 2. С. 48-56. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-2-48-56>

Original article

ANALYSIS OF THE RESULTS OF FIELD AND COMPUTATIONAL STUDIES OF THE STRENGTH AND STABILITY OF THE STONE-FILL DAM OF THE BOGUCHANSKAYA HYDROELECTRIC POWER STATION, PREDICTING ITS CONDITION

E.N. Bellendir, O.D. Rubin, S.V. Yurjev[✉], S.E. Lisichkin, I.V. Baklykov

¹ JSC “Design, survey and research Institute Hydroproject named after S.Y. Zhuk”, 125080, 2, Volokolamskoye shosse, Moscow, Russia

² Branch of JSC “Design, survey and research Institute Hydroproject named after S.Y. Zhuk” – “Research institute of energy structures”, 125080, 2, Volokolamskoye shosse, Moscow, Russia

³ National research Moscow state university of civil engineering, 26, Yaroslavskoye shosse, Moscow, 129337. Russia

Abstract. The results of complex field and computational studies of the strength and stability of the stone-fill dam of the Boguchanskaya HPP are presented. The purpose of the work is a comprehensive assessment of the state of the stone-fill dam of the Boguchanskaya HPP, including

forecasting its condition. An analysis of the data of field observations was carried out, which showed a number of differences from the design prerequisites. Analysis of the data on precipitation and horizontal displacements of the marks installed on the berms of the lower thrust prism of the SFD of the Boguchanskaya HPP showed that they are not extinguished. On the basis of the developed and calibrated spatial permanent finite element model, comprehensive computational studies of the stress-strain state of the stone-fill dam of the Boguchanskaya HPP were carried out (including the sections in which the highest precipitation and horizontal displacements of the marks installed on the berms of the lower thrust prism of the stone-fill dam were recorded), taking into account the data of field observations, including deviations from the project. Calculations showed that with the actual profile of the stone-fill dam of the Boguchanskaya HPP, slightly less than in the project, the value of the stability factor of the lower slope was 1.32-1.33, which exceeds the standard value of 1.25. At the stage of forecasting the state of the stone-fill dam of the Boguchanskaya HPP for the period up to 2040, the estimated value of the stability factor of the lower slope may be 1.25, which is equal to standard value (i.e. the margin is minimal). At present, the stability of the lower slope of the stone-fill dam is ensured, despite the deviations of the actual dimensions of the profile of the stone-fill dam from the design values. With further growth of sediment, as well as horizontal displacements of marks installed on the berms of the lower thrust prism, the stability of the lower slope of the stone-fill dam may change.

Keywords: strength and stability, computational studies, hydraulic structures, stone-fill dam, asphalt concrete diaphragm, precipitation and displacement of marks, spatial finite element model

Format of citation: Bellendir E.N., Rubin O.D., Yurjev S.V., Lisichkin S.E., Baklykov I.V. Analysis of the results of field and computational studies of the strength and stability of the stone-fill dam of the Boguchanskaya hydroelectric power station, predicting its condition // Prirodoobustrojstvo. 2024. No. 2. P. 48-56. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-2-48-56>

Введение. Напорный фронт Богучанской ГЭС общей длиной 2618 м в левобережной части создает бетонная гравитационная плотина длиной 757 м, а в центральной и правобережной частях – каменно-набросная плотина (КНП) длиной 1861 м [1, 2].

Каменно-набросная плотина располагается на скальном массиве, который в правой части (на длине 926 м) сложен осадочными породами Кембрия и Ордовика раннепалеозойского возраста, а в левой части (в зоне примыкания к бетонной плотине) на протяжении 748 м – долеритами. На поверхности массива скальных пород залегают аллювиальные отложения мощностью до 2,0 м.

Основные параметры конструкции КНП:

- максимальный напор – 72,50 м;
- наибольшая строительная высота – 77,00 м;
- длина по гребню – 1861,00 м;
- ширина по гребню – 20,00 м;
- ширина по подошве – 440,00 м.

В состав каменно-набросной плотины входит асфальтобетонная диафрагма (АБД), выполняемая по специальной технологии из литой гидротехнической асфальтобетонной смеси, укладываемой в разогретом состоянии, и эксплуатируемая в суровых климатических условиях [2]. Вертикальная противифльтрационная асфальтобетонная диафрагма расположена по оси КНП. Ширина асфальтобетонной диафрагмы

по основанию составляет 3,9 м. Выше диафрагма имеет ступенчато-переменное сечение, изменяясь по ширине от 3,9 до 0,80 м.

Важнейшую особенность КНП представляют фактические размеры ее поперечных профилей, несколько отличающиеся от проектных значений (меньше проектных).

Данные натурных наблюдений, зафиксированные в 2022 г., показали, что отмечается рост осадок и горизонтальных смещений марок, установленных на бермах низовой упорной призмы каменно-набросной плотины, обусловленных продолжающимся уплотнением каменной наброски низовой упорной призмы.

Цель исследований: комплексная оценка состояния каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС, в том числе с прогнозированием ее состояния.

Материалы и методы исследований. Особенности состояния КНП, зафиксированные методом регулярно проводимых натурных наблюдений, были использованы при оценке состояния КНП и проведении расчетных исследований НДС на основе численного моделирования.

Максимальные осадки марки, установленной на берме низовой упорной призмы КНП, составляющие 832 мм, зафиксированы в створе, расположенном на удалении 1174 м от бетонной плотины (рис. 1). Рост осадок марок продолжается.

На рисунке 2 представлены графики горизонтальных смещений марок, установленных на бермах низовой упорной призмы КНП в створе, расположенном на удалении 1174 м от бетонной плотины. Рост горизонтальных смещений марок продолжается.

Из данных рисунка 2 следует, что в процессе наполнения водохранилища горизонтальные смещения марок, установленных на берме низовой упорной призмы, имели знакопеременный характер. Так, на начальной стадии отмечалось смещение в сторону верхнего бьефа (при наполнении водохранилища до пускового уровня), а дальнейший подъем уровня верхнего бьефа до НПУ привел к смене направления смещения марок в сторону нижнего бьефа, и в настоящее время указанные смещения имеют незатухающий характер.

Для выполнения расчетных исследований НДС была разработана пространственная, постоянно действующая конечно-элементная модель каменно-набросной плотины с основанием, включающая в себя узлы сопряжения ее с бетонной плотиной и с правым берегом (рис. 3).

В рамках моделирования грунтов тела плотины использовалась теория Кулона-Мора, а также модель упрочняющегося грунта Hardening Soil. При этом был учтен отечественный и зарубежный опыт моделирования бетонных и грунтовых гидротехнических сооружений с основаниями [3-12].

При проведении расчетных исследований учитывались поэтапное возведение КНП и наполнение водохранилища, а также моделировались этапы эксплуатации, включая этап фактического состояния КНП в настоящее время

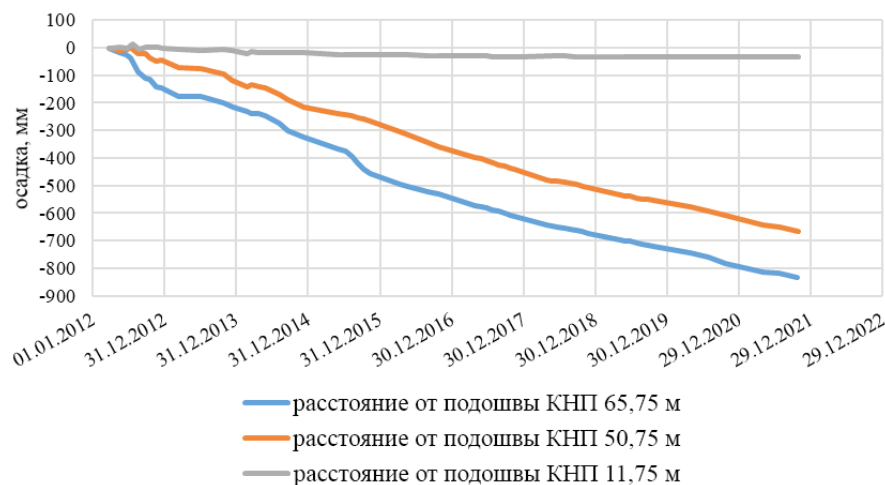


Рис. 1. Графики осадок марок, мм, установленных на бермах низовой упорной призмы КНП в створе, расположенном на удалении 1174 м от бетонной плотины

Fig. 1. Graphs of settlement of marks (mm) installed on the berms of the lower thrust prism of the SFD in the alignment located at a distance of 1174 m from the concrete dam

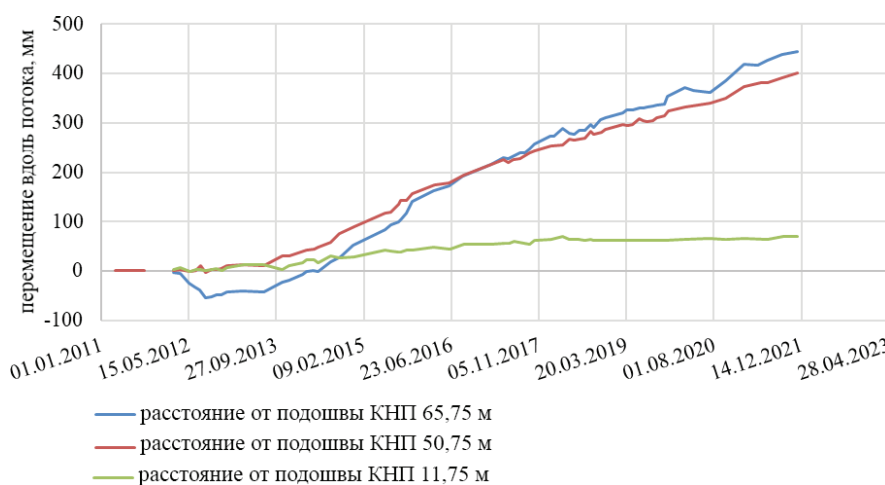


Рис. 2. Графики горизонтальных смещений марок, установленных на бермах низовой упорной призмы КНП в створе, расположенном на удалении 1174 м от бетонной плотины

Fig. 2. Graphs of horizontal displacements of marks installed on the berms of the lower thrust prism of the SFD in the alignment located at a distance of 1174 m from the concrete dam

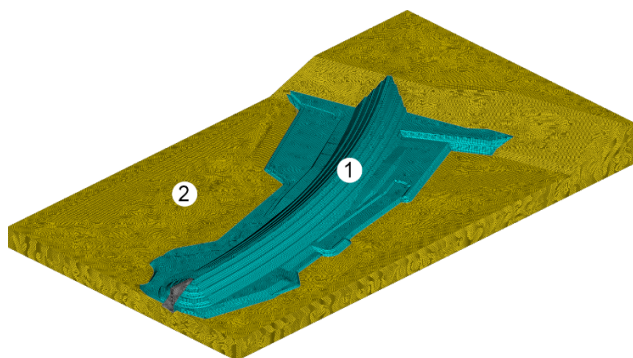


Рис. 3. Пространственная конечно-элементная модель КНП с основанием:

1 – КНП, 2 – основание

Fig. 3. Spatial finite element model of SFD with the foundation:

1 – KNP, 2 – base

и этапы прогнозного состояния КНП при прогнозируемых дальнейших осадках и горизонтальных смещениях марок, установленных на берегах низовой упорной призмы.

Максимальное гидростатическое давление на КНП на этапах эксплуатации принималось равным УВБ.

В целях оценки состояния участка КНП, примыкающего к бетонной плотине, с учетом прогнозирования осадок и горизонтальных смещений марок, установленных на берме низовой упорной призмы, были выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния на основе пространственной конечно-элементной модели участка КНП, примыкающего к бетонной плотине.

Результаты и их обсуждение

Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости в период эксплуатации в настоящее время. Поскольку АБД является противофильтрационным элементом КНП, большое значение уделялось ее напряженному состоянию и сплошности. Поэтому на расчетных этапах контролировались величины напряжений, возникающих в АБД, в том числе касательных напряжений.

Величина касательных напряжений в АБД составляет 0,38 МПа. В соответствии с паспортом трехосных испытаний АБД, выполненных в АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», максимальные допустимые значения касательных напряжений составляют 0,45 МПа. Таким образом, полученные расчетом значения касательных напряжений (0,38 МПа) не превышают предельно допустимых значений (0,45 МПа), то есть имеется определенный запас прочности АБД (в пределах 18%).

Главным показателем состояния КНП является устойчивость откосов. При расчетном обосновании фактического профиля КНП, несколько отличающегося от проектного, выполнялись расчеты устойчивости верхового и низового откосов для круглоцилиндрических поверхностей скольжения. При этом расчетное значение коэффициента запаса устойчивости низового откоса при текущих осадках марки (832 мм), установленной на берме низовой упорной призмы КНП в створе, расположенном на удалении 1174 м от бетонной плотины, составляет $K_{зап} = 1,33$, что превышает нормативное значение коэффициента запаса устойчивости (1,25).

Расчетное значение коэффициента запаса устойчивости при текущих горизонтальных смещениях марок (784 мм), установленных на берме низовой упорной призмы КНП в створе, расположенном на удалении 1630 м от бетонной плотины, составляет $K_{зап} = 1,32$, что превышает нормативное значение коэффициента запаса устойчивости (1,25).

Для сравнения проектное значение коэффициента запаса устойчивости без учета фактического профиля КНП составляет $K_{зап} = 1,55$, то есть за счет уменьшения размеров поперечного профиля КНП произошло снижение запаса устойчивости на 14,8%.

Результаты расчетов устойчивости откосов на других участках КНП показали более высокие значения коэффициентов запаса устойчивости и также превышают нормативное значение коэффициента устойчивости (1,25).

Таким образом, в настоящее время устойчивость низового откоса КНП обеспечивается с учетом отклонений размеров поперечного профиля плотины от проектных предпосылок (меньше проектных).

Результаты расчетов для этапов эксплуатации КНП с прогнозированием ее состояния до 2040 г. при возможном дальнейшем росте осадок и горизонтальных смещений марок, установленных на берегах низовой упорной призмы.

Расчетные исследования НДС при прогнозировании дальнейшего роста осадок и горизонтальных смещений марок, установленных на берегах низовой упорной призмы КНП (на период до 2040 г.), проводились на основе откалиброванной пространственной, постоянно действующей конечно-элементной модели, которая позволяет осуществлять прогнозирование состояния КНП с учетом наметившихся тенденций изменений контролируемых показателей, в том числе с учетом роста осадок и горизонтальных

смещений марок, установленных на бермах низовой упорной призмы КНП. При этом моделировались прогнозируемые дальнейшие осадки и горизонтальные смещения марок, установленных на бермах низовой упорной призмы (на период до 2040 г.).

На рисунке 4 представлены графики фактических, прогнозных и допустимых осадок марок, установленных на берме низовой упорной призмы (на период до 2040 г.).

Из данных рисунка 4 следует, что максимальное прогнозное значение осадки марки, установленной на берме низовой упорной призмы в створе, расположенном на удалении 1174 м от бетонной плотины, составляет 1270 мм. На рисунке 5 представлены графики фактических, прогнозных и допустимых горизонтальных смещений марок, установленных на берме низовой упорной призмы (на период до 2040 г.).

Из данных рисунка 5 следует, что максимальное прогнозное горизонтальное смещение марки, установленной на берме низовой упорной призмы в створе, расположенном на удалении 1630 м от бетонной плотины, составляет 1290 мм.

Было определено также прогнозируемое напряженное состояние АБД (на период до 2040 г.) включая распределение и величину касательных напряжений.

Максимальная прогнозируемая величина касательных напряжений в АБД может составить значение 0,47 МПа, которое является близким к предельно допустимому значению (0,45 МПа) и может повлиять на сплошность АБД и возможную фильтрацию воды в низовую упорную призму КНП.

Расчетное значение коэффициента запаса устойчивости низового откоса при прогнозных значениях осадок марок (1270 мм), установленных на бермах низовой упорной призмы, может составить $K_{\text{зап}} = 1,25$, что равно нормативному значению коэффициента запаса устойчивости (1,25).

Таким образом, на этапе прогнозного состояния КНП (на период до 2040 г.) при прогнозируемом дальнейшем росте осадок марок, установленных на бермах низовой упорной призмы, устойчивость низового откоса КНП обеспечивается с минимальным запасом.

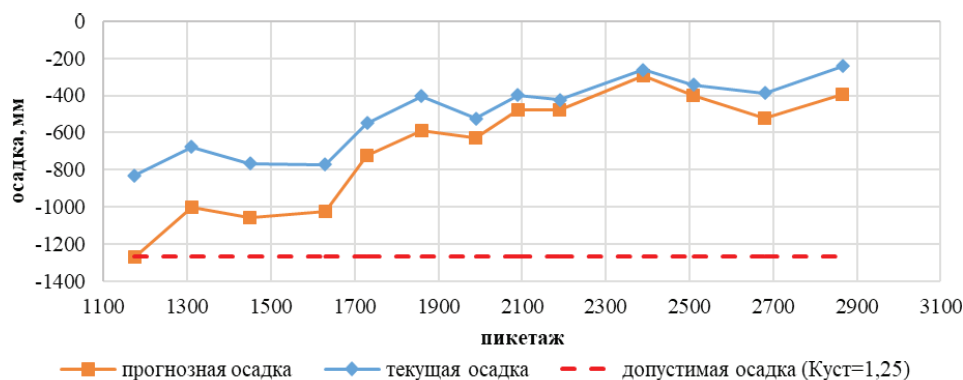


Рис. 4. Графики фактических, прогнозных и допустимых осадок марок, установленных на берме низовой упорной призмы (на период до 2040 г.)

Fig. 4. Graphs of actual, forecast and permissible sediments of marks installed on the berm of the lower thrust prism (for the period up to 2040)

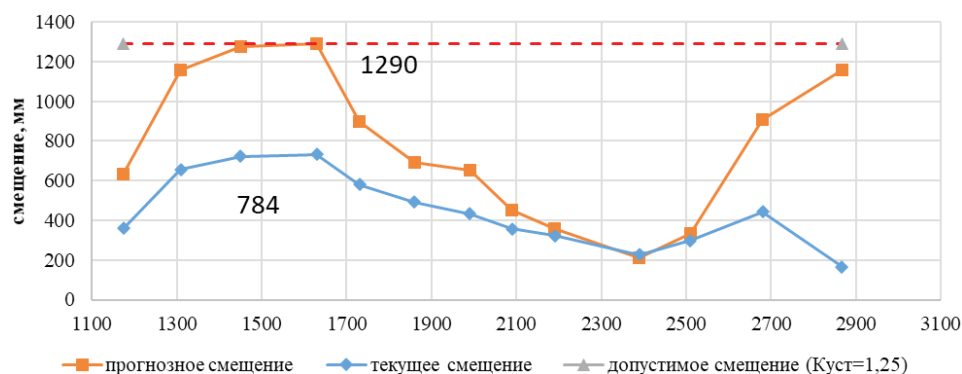


Рис. 5. Графики фактических, прогнозных и допустимых горизонтальных смещений марок, установленных на берме низовой упорной призмы (на период до 2040 г.)

Fig. 5. Graphs of actual, forecast and permissible horizontal displacements of marks installed on the berm of the lower thrust prism (for the period up to 2040)

Расчетное значение коэффициента запаса устойчивости низового откоса при прогнозных значениях горизонтальных смещений марок (1290 мм), установленных на бермах низовой упорной призмы, может составить $K_{\text{зап}} = 1,25$, что равно нормативному значению коэффициента запаса устойчивости (1,25).

Таким образом, на этапе прогнозного состояния КНП (на период до 2040 г.) при прогнозируемом дальнейшем росте горизонтальных смещений марок, установленных на бермах низовой упорной призмы, устойчивость низового откоса КНП обеспечивается с минимальным запасом, то есть при дальнейшем росте осадок, а также горизонтальных смещений марок, установленных на бермах низовой упорной призмы, может измениться устойчивость низового откоса КНП.

Результаты расчетов для этапов эксплуатации участка КНП, примыкающего

к бетонной плотине, с прогнозированием его состояния до 2050 г. при возможном дальнейшем росте осадок и горизонтальных смещений марок, установленных на бермах низовой упорной призмы.

Было выполнено прогнозирование величин осадок и горизонтальных смещений марок, установленных на берме низовой упорной призмы участка примыкания КНП к бетонной плотине, на период до 2050 г.

На рисунках 6-8 представлены графически прогнозные величины осадок и горизонтальных смещений марок, установленных на берме низовой упорной призмы участка примыкания КНП к бетонной плотине, на период до 2050 г.

На основе пространственной конечно-элементной модели участка КНП, примыкающего к бетонной плотине, получены значения осадок и горизонтальных смещений марок,

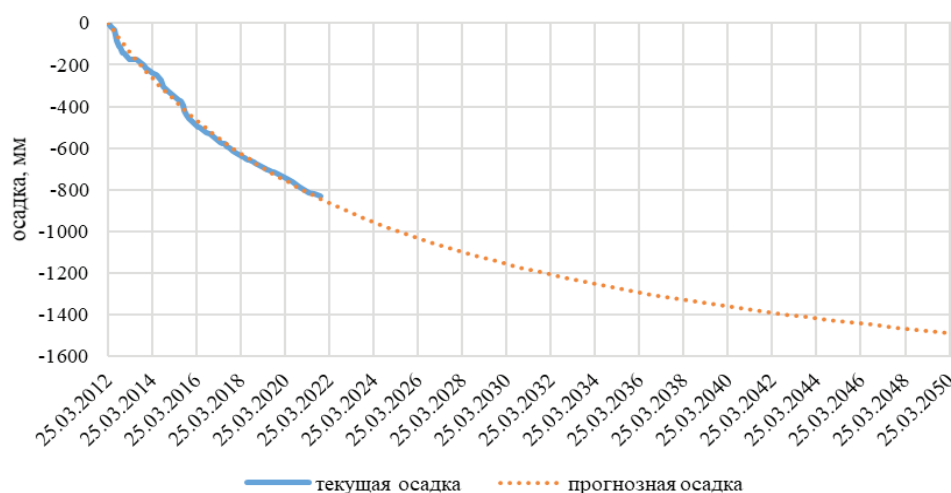


Рис. 6. График прогнозных осадок марок, установленных на берме низовой упорной призмы, на период до 2050 г.

Fig. 6. Graphs of forecast settlements of marks installed on the berm of the lower thrust prism, for the period up to 2050

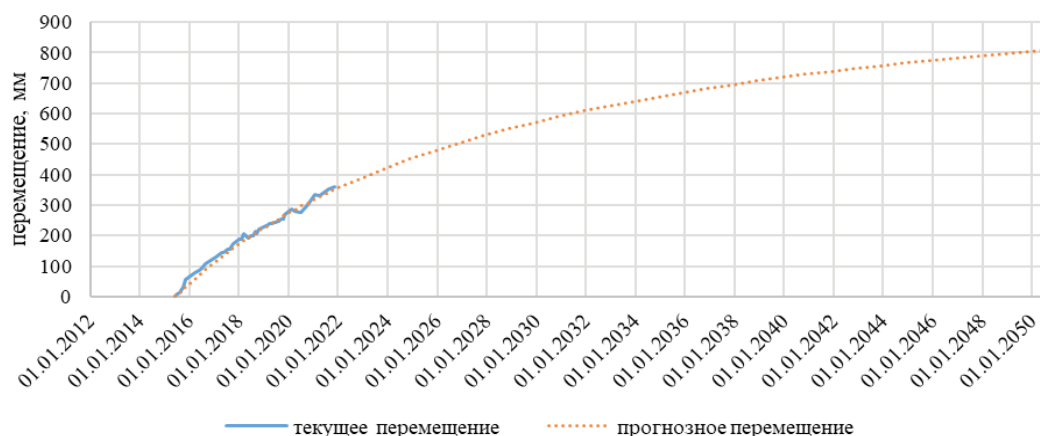


Рис. 7. График прогнозных горизонтальных смещений вдоль потока марок, установленных на берме низовой упорной призмы, на период до 2050 г.

Fig. 7. Graphs of forecast settlements of marks installed on the berm of the lower thrust prism, for the period up to 2050

установленных на бермах низовой упорной призмы участка КНП, примыкающего к бетонной плотине, при прогнозировании состояния КНП на период до 2050 г.

В таблице представлены результаты расчетов прогнозных осадок и горизонтальных смещений марок, установленных на бермах низовой упорной призмы участка КНП, примыкающего к бетонной плотине.

Как следует из данных таблицы, по причине недоуплотненности грунтов тела КНП при их укладке, а также их последующей консолидации имеется тенденция дальнейшего увеличения осадок и горизонтальных смещений низовой упорной призмы КНП, однако расчеты

с учетом модели упрочняющегося грунта Hardening Soil показали затухание осадок и смещений к 2042 году.

С учетом прогнозируемых осадок и горизонтальных смещений марок (на период до 2050 г.), установленных на бермах низовой упорной призмы участка КНП, примыкающего к бетонной плотине, устойчивость низового откоса КНП может измениться.

Для безопасной эксплуатации КНП Богучанской ГЭС необходимо разработать проект и реализовать проектные решения по предотвращению дальнейшего роста осадок и горизонтальных смещений низовой упорной призмы в сторону нижнего бьефа.



Рис. 8. График прогнозных горизонтальных смещений поперек потока марок, установленных на берме низовой упорной призмы, на период до 2050 г.

Fig. 8. Graph of forecast horizontal displacements along the flow of marks installed on the berm of the lower thrust prism, for the period up to 2050

Таблица. Результаты расчета прогнозных осадок и горизонтальных смещений марок на период до 2050 г.

Table. Results of calculation of forecast settlements and horizontal displacements of marks for the period up to 2050

Наименование <i>Name</i>	С учетом проектных параметров каменной наброски <i>Taking into account design parameters of the stone fill</i>	С учётом корректировки параметров каменной наброски на основе данных натурных наблюдений <i>Taking into account the correction of the parameters of the stone fill on the basis of field observations</i>
Горизонтальные смещения вдоль потока UX, мм <i>Horizontal displacements along the UX flow, mm</i>	485,6	776,9
Осадки UY, мм / <i>Settlements UY, mm</i>	1011,4	1517,1
Горизонтальные смещения поперёк потока UZ, мм <i>Horizontal displacements across the flow UZ, mm</i>	-50,7	-152,0

Выводы

1. К конструктивной особенности КНП Богучанской ГЭС следует отнести наличие вертикальной противофильтрационной асфальтобетонной диафрагмы (АБД), возведенной по специальной технологии (путем укладки литого гидротехнического асфальтобетона в разогретом состоянии) и эксплуатируемой в суровых климатических условиях.

2. Анализ особенностей КНП Богучанской ГЭС, влияющих на ее состояние, показал некоторое отличие фактических размеров поперечных профилей по протяженности КНП от проектных величин (фактические размеры меньше проектных). Показано, что устойчивость откосов КНП обеспечивается с учетом отклонений размеров поперечных профилей от проектных предпосылок при ми-

нимальном значении коэффициента запаса $K_{\text{зап}} = 1,32$.

3. Анализ данных по осадкам и горизонтальным смещениям марок, установленных на бермах низовой упорной призмы КНП Богучанской ГЭС, показал, что они носят незатухающий характер и их максимальные значения составляют, соответственно, 832 мм (осадка) в створе, расположенном на удалении 1174 м от бетонной плотины, и 784 мм (горизонтальное смещение) в створе, расположенном на удалении 1630 м от бетонной плотины.

4. На основе разработанной и откалиброванной пространственной, постоянно действующей конечно-элементной модели, впервые были проведены комплексные расчетные исследования напряженно-деформированного состояния КНП Богучанской ГЭС (включая створы, в которых зафиксированы наибольшие осадки и горизонтальные смещения марок, установленных на бермах низовой упорной призмы КНП).

5. Поскольку запасы устойчивости откосов являются главной характеристикой состояния КНП, определялись коэффициенты запаса устойчивости низового откоса при фактическом профиле КНП Богучанской ГЭС, несколько отличном от проектных предпосылок. На этапе состояния в настоящее время значение коэффициента запаса устойчивости низового откоса составляет $K_{\text{зап}} = 1,32-1,33$, что превышает нормативное значение коэффициента запаса устойчивости, равное 1,25. Таким образом, в настоящее время устойчивость низового откоса КНП обеспечивается несмотря на отклонения фактических размеров профиля КНП от проектных величин.

6. На этапе прогнозного состояния КНП Богучанской ГЭС на период до 2040 г. расчетное значение коэффициента запаса устойчивости

низового откоса может составить $K_{\text{зап}} = 1,25$, что равняется нормативному значению коэффициента запаса устойчивости (1,25). При дальнейшем росте осадок, а также горизонтальных смещений марок, установленных на бермах низовой упорной призмы, может измениться устойчивость низового откоса КНП.

7. На этапе состояния КНП Богучанской ГЭС в настоящее время величина касательных напряжений в АБД составляет 0,38 МПа, что менее предельно допустимых значений, равных 0,45 МПа (определенных в АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» путем трехосных испытаний).

8. На этапе прогнозного состояния КНП Богучанской ГЭС на период до 2040 г. касательные напряжения в АБД могут составить значение 0,47 МПа, которое является близким к предельно допустимому значению 0,45 МПа, что может повлиять на сплошность АБД и возможную фильтрацию воды в низовую упорную призму КНП.

9. Выполнено прогнозирование осадок и смещений марок, установленных на берме низовой упорной призмы участка КНП, примыкающего к бетонной плотине Богучанской ГЭС, на период до 2050 г., которое показало, что осадки и смещения в дальнейшем имеют тенденцию увеличения. С учетом прогнозируемых осадок и горизонтальных смещений марок, установленных на бермах низовой упорной призмы участка КНП, примыкающего к бетонной плотине, устойчивость низового откоса КНП может измениться.

10. Для безопасной эксплуатации КНП Богучанской ГЭС необходимо разработать проект и реализовать проектные решения по предотвращению дальнейшего роста осадок и горизонтальных смещений низовой упорной призмы в сторону нижнего бьефа.

Список использованных источников

- СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003. М.: 2012. 40 с.
- СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84*. М.: 2012. 110 с.
- Зарецкий Ю.К., Ломбардо В.Н. Статика и динамика грунтовых плотин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 256 с.; ил.
- Волынчиков А.Н., Газиев Э.Г. Поведение бетонной и каменно-набросной плотин Богучанской ГЭС в период наполнения водохранилища (2012-2015 гг.) // Гидротехническое строительство. 2015. № 12. С. 13-23.
- Волынчиков А.Н., Мгалобелов Ю.Б., Баклыков И.В. Сопряжение бетонной и каменно-набросной плотин Богучанской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2014. № 10. С. 2-9.

References

- SP 58.13330.2012. Hydraulic structures. General provisions. Updated edition of SNiP 33-01-2003. Moscow, 2012. 40 p.
- SP 39.13330.2012 "Dams made of soil materials" Updated edition of SNiP 2.06.05-84*, Moscow, 2012. 110 p.
- Zaretsky Yu.K., Lombardo V.N. Statics and dynamics of ground dams. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 256 p. with ill.
- Volynchikov A.N., Gaziev E.G. Behavior of the concrete and stone-fill dams of the Boguchanskaya hydroelectric power station during the period of filling the reservoir (2012-2015)]. // Hydraulic engineering construction. 2015. No. 12. pp. 13-23.
- Volynchikov A.N., Mgalobelov Yu.B., Baklykov I.V. Conjugation of concrete and stone-fill dams of the Boguchanskaya hydroelectric power station // Hydraulic engineering construction. 2014. № 10. P. 2-9.

6. **Баклыков И.В.** Анализ поведения сопряжения бетонной и каменно-набросной плотин Богучанской ГЭС в период наполнения // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2014. № 273. С. 84-95.

7. **Рубин О.Д.** Расчетное обоснование решений по обеспечению надежности конструкций водосброса № 2 бетонной плотины Богучанской ГЭС / Лисичкин С.Е., Гребенщиков В.П., Цыбаков В.А. и др. // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2005. С. 227-233.

8. **Рубин О.Д.,** Особенности состояния бетонных сооружений Богучанской ГЭС / Волыничков А.Н., Воробьев А.Л., Гребенщиков В.П., Лисичкин С.Е. // Гидротехническое строительство. 2007. № 11. С. 26-30.

9. **Arash Ghafari.** Finite element analysis of deformation and arching inside the core of embankment dams during construction, Australian // Journal of Civil Engineering. 2015, 14(1), P. 13-22.

10. **López-Acosta N.P.** Geotechnical Engineering Applied on Earth and Rock-Fill Dams, Hydraulic Structures – Theory and Applications. 2019. Pp. 1-17.

11. **Chao Tong.** Research on Analyzing Earth Rockfill Dam Seepage and Slope Stability Advanced Materials Research. 2014. Vol. 889-890. Pp. 1379-1382.

12. **Zakariae Kahot.** Reliability analysis of slope stability in earthen dams following rapid drawdown // International Journal of Applied Sciences and Engineering. 2019. Pp. 1-12.

6. **Baklykov I.V.** Analysis of the behavior of the conjugation of concrete and stone-fill dams of the Boguchanskaya hydroelectric power station during the period of filling // Izvestiya VNIIG named after B.E. Vedeneev. 2014. № 273. P. 84-95.

7. **Rubin O.D.** Calculation justification of decisions to ensure the reliability of spillway structures No. 2 of the concrete dam of the Boguchanskaya HPP / Lisichkin S.E., Grebenshchikov V.P., Tsybakov V.A. et al. // Izvestiya VNIIG named after B.E. Vedeneev. vol. 244, St. Petersburg, 2005. P. 227-233.

8. **Rubin O.D.** Features of the state of concrete structures of the Boguchanskaya HPP / Volynchikov A.N., Vorobyov A.L., Grebenshchikov V.P., Lisichkin S.E. // Hydrotechnical construction. 2007. No. 11. P. 26-30.

9. **Arash Ghafari.** Finite element analysis of deformation and arching inside the core of embankment dams during construction, Australian Journal of Civil Engineering. 2015, 14(1), P. 13-22.

10. **López-Acosta N.P.** Geotechnical Engineering Applied on Earth and Stone-Fill Dams, Hydraulic Structures – Theory and Applications, 2019. P. 1-17.

11. **Chao Tong – Research on Analyzing Earth Stonefill Dam Seepage and Slope Stability Advanced Materials Research Vols. 889-890, 2014. P. 1379-1382.**

12. **Zakariae Kahot.** Reliability analysis of slope stability in earthen dams following rapid drawdown, International Journal of Applied Sciences and Engineering, 2019. P. 1-12.

Об авторах

Евгений Николаевич Беллендир, д-р техн. наук, генеральный директор АО «Институт Гидропроект»; SPIN-код: 7975-2841, AuthorID: 272223; e.bellendir@hydroproject.ru

Олег Дмитриевич Рубин, д-р техн. наук, директор по научной деятельности АО «Институт Гидропроект», профессор НИУ МГСУ; SPIN-код: 2720-6627, AuthorID:423001, Scopus 7004427140, ResearcherIDAAE-6688-2022, ORCID0000-0002-0630-3251; o.rubin@hydroproject.ru

Сергей Владимирович Юрьев, инженер, заместитель главного инженера по основным сооружениям АО «Институт Гидропроект»; ORCID0000-0002-2609-2711; s.yurev@hydroproject.ru

Сергей Евгеньевич Лисичкин, д-р техн. наук, главный специалист филиала АО «Институт Гидропроект»-«НИИЭС»; SPIN-код: 5423-0643, AuthorID: 368472, Scopus6603919071, ORCID0000-0003-2761-331X, lisichkin1989@rambler.ru

Игорь Вячеславович Баклыков, инженер, ведущий специалист филиала АО «Институт Гидропроект»-«НИИЭС»; SPIN-код: 7987-9045, AuthorID: 915462, Scopus: 56538614100, ORCID0000-0002-8374-9046, i.baklykov@hydroproject.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Беллендир Е.Н., Рубин О.Д., Юрьев С.В., Лисичкин С.Е., Баклыков И.В. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Criteria of authorship

The authors declare no conflict of interest / Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Вклад авторов

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 22.12.2023

Поступила после рецензирования / Received after peer review 15.01.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 15.01.2024

Author information

Evgeniy N. Bellendir, DSc (Eng), General director JSC “Institute Hydroproject”; SPIN-code: 7975-2841, AuthorID: 272223; e.bellendir@hydroproject.ru

Oleg D. Rubin, DSc (Eng), Director of Scientific Activity of JSC “Institute of Hydroproject”, Professor of the National Research University MGSU, survey and research Institute Hydroproject” – “Research institute of energy structures”, professor NIU MGSU; SPIN-код: 2720-6627, AuthorID:423001, Scopus 7004427140, ResearcherIDAAE-6688-2022, ORCID0000-0002-0630-3251; o.rubin@hydroproject.ru

Sergey V. Yurjev, engineer, Deputy chief engineer on basic structures JSC “Institute Hydroproject”; ORCID0000-0002-2609-2711; s.yurev@hydroproject.ru

Sergey E. Lisichkin, DSc (Eng), chief specialist of the branch of JSC “Institute Hydroproject” – “NIIES (Research institute of energy structures); SPIN-код: 5423-0643, AuthorID: 368472, Scopus6603919071, ORCID0000-0003-2761-331X, lisichkin1989@rambler.ru

Igor V. Baklykov, engineer, leading specialist of the JSC “Institute Hydroproject” – “NIIES (Research institute of energy structures); SPIN-код: 7987-9045, AuthorID: 915462, Scopus: 56538614100, ORCID0000-0002-8374-9046, i.baklykov@hydroproject.ru

Bellendir E.N., Rubin O.D., Yurjev S.V., Lisichkin S.E., Baklykov I.V. performed practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism.