

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-1-49-56>

УДК 627.8:693.5



РАСЧЕТЫ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СОПРЯЖЕНИЯ БЕТОННОЙ И КАМЕННО-НАБРОСНОЙ ПЛОТИН БОГУЧАНСКОЙ ГЭС

Е.Н. Беллендир^{1✉}, О.Д. Рубин^{2,3✉}, С.В. Юрьев¹, С.Е. Лисичкин², И.В. Баклыков²

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

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

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

Аннотация. Сопряжение бетонной плотины с каменно-набросной плотиной является наиболее ответственным участком напорного фронта Богучанской ГЭС. Важнейшей особенностью Богучанской ГЭС является наличие противофильтрационного элемента – асфальтобетонной диафрагмы, которая выполняется по специальной технологии из литой гидротехнической асфальтобетонной смеси, укладываемой в разогретом состоянии. От состояния узла сопряжения асфальтобетонной диафрагмы с секцией № 34 бетонной плотины (в том числе от состояния контактного шва между ними) зависит безопасность напорного фронта гидроузла. После начала заполнения водохранилища в 2012 г. было зафиксировано раскрытие контактного шва между АБД и секцией № 34 бетонной плотины, также отмечалась осадка АБД относительно секции № 34 бетонной плотины. В настоящее время раскрытие контактного шва и осадки нельзя назвать стабилизированным. Целью исследований являлось расчетное определение напряженно-деформированного состояния сопряжения бетонной и каменно-набросной плотин Богучанской ГЭС. На основе пространственной конечно-элементной модели сопряжения бетонной плотины с каменно-набросной плотиной, с учетом данных натурных наблюдений и отклонений от проектных предпосылок, были выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния. Результаты расчетов показали, что контролируемые величины не превышают критериальных значений.

Ключевые слова: сопряжение бетонной и каменно-набросной плотин, асфальтобетонная диафрагма, шахта с асфальтовой мастикой, пространственная конечно-элементная модель, напряженно-деформированное состояние

Формат цитирования: Беллендир Е.Н., Рубин О.Д., Юрьев С.В., Лисичкин С.Е., Баклыков И.В. Расчеты напряженно-деформированного состояния сопряжения бетонной и каменно-набросной плотин Богучанской ГЭС // Природообустройство. 2024. № 1. С. 49-56. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-1-49-56>

Original article

CALCULATIONS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE CONJUGATION OF THE CONCRETE AND ROCK-FILL DAMS OF THE BOGUCHANSKAYA HPP

E.N. Bellendir^{1✉}, O.D. Rubin^{2,3✉}, S.V. Yuriev¹, S.E. Lisichkin², I.V. Baklykov²

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

² Branch of JSC “Design, Survey and Research Institute Hydroproject named after S.Y. Zhuk” – “Research Institute of Energy Structures”, 125080, Moscow, Volokolamskoye shosse, 2, Russia

³ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, 129337, Yaroslavskoye shosse, 26, Russia

Abstract. The conjugation interface of the concrete dam with the rock-fill dam is the most critical section of the pressure front of the Boguchanskaya HPP. The most important feature of the Boguchanskaya HPP is the presence of an impervious element – an asphalt concrete diaphragm, which is made using a special technology from a cast hydraulic asphalt concrete mixture laid in a heated state. The safety of the pressure front of the hydroelectric complex depends on the condition of the junction of the asphalt concrete diaphragm with section No. 34 of the concrete dam (including

the condition of the contact joint between them). After the beginning of filling the reservoir in 2012, the opening of the contact joint between the ABD and section No. 34 of the concrete dam was recorded, and the settlement of the ABD relative to section No. 34 of the concrete dam was also noted. At present, the opening of the contact seam and the settlement cannot be called stabilized. The aim of the research is to determine the computational stress-strain state of the conjugation between the concrete and rock-fill dams of the Boguchanskaya HPP. On the basis of a spatial finite element model of the conjunction of a concrete dam with a rock-fill dam, taking into account the data of field observations and deviations from the design prerequisites, calculations of the stress-strain state were performed. The results of the calculations showed that the controlled values do not exceed the criterion values.

Keywords: conjugation of concrete and rock-fill dams, asphalt concrete diaphragm, a mine with asphalt mastic, spatial finite element model, stress-strain state

Format of citation: Bellendir E.N., Rubin O.D., Yuriev S.V., Lisichkin S.E., Baklykov I.V. Calculations of the stress-strain state of conjugation of the concrete and rock-fill dams of the Boguchanskaya HPP // Prirodoobustrojstvo. 2024. No 1. P. 49-56. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-1-49-56>

Введение. Наиболее ответственным участком напорного фронта Богучанской ГЭС является сопряжение бетонной плотины с каменно-набросной плотиной (КНП) [1, 2].

Сопряжение бетонной плотины с каменно-набросной плотиной Богучанской ГЭС осуществляется обсыпкой конусами упорных призм 5 глухих бетонных секций (№ 30-34), каждая из которых имеет длину 22,0 м (рис. 1). В нижней части откосы верхового и низового конусов упираются в подпорные стенки временного шлюза [1, 2].

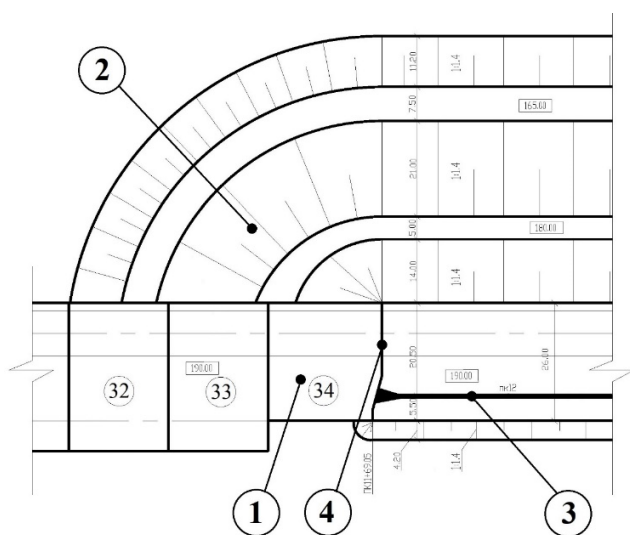


Рис. 1. Сопряжение бетонной и каменно-набросной плотин в плане:

- 1 – бетонная плотина;
- 2 – каменно-набросная плотина;
- 3 – асфальтобетонная диафрагма;
- 4 – сопряжение бетонной и каменно-набросной плотин

Fig. 1. Junction of concrete and rock-fill dams in the plan:

- 1 – concrete dam; 2 – rock-fill dam;
- 3 – asphalt concrete diaphragm;
- 4 – conjunction of concrete and rock-fill dams

Необходимо отметить, что особенностью Богучанской ГЭС является наличие противофильтрационного элемента – асфальтобетонной диафрагмы (АБД), которая выполняется по специальной технологии из литой гидротехнической асфальтобетонной смеси, укладываемой в разогретом состоянии [3-6, 8]. При проектировании и строительстве уникального сооружения каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС был также учтен зарубежный опыт строительства плотин с асфальтобетонными диафрагмами [7, 9-11]. В итоге при актуализации технического проекта в 2008 г. был принят следующий вариант сопряжения асфальтобетонной диафрагмы с секцией № 34 бетонной плотины.

Сопряжение осуществляется за счет устройства в торце последней глухой секции № 34 скоса грани на длине 7,5 м в сторону нижнего бьефа 1:3,75. В то же время торцевая грань секции № 34 выполняется с уклоном 20:1. АБД, примыкающая к бетонной грани секции № 34, со скосом расширяется в плане до 4,0 м для более надежного контакта с бетонной плотиной. Предполагается, что при наполнении водохранилища под напором воды АБД прижимается к бетонной плотине и перемещается вдоль грани со скосом, обеспечивая плотный контакт по шву.

Чтобы избежать в начальный период наполнения водохранилища перемещения каменной наброски плотины в сторону верхнего бьефа, было предложено по всему контакту между бетонной секцией № 34 и АБД установить 2 U-образные шпонки из латуни, которые крепятся анкерами, а в асфальтобетон заводятся путем устройства шахты с последующим ее заполнением асфальтовой мастикой. Со стороны АБД выполняется шпоночный колодец из половины трубы диаметром 1020 мм, которая примыкает к бетонной секции и заполняется, как и шахта, асфальтовой мастикой. При деформациях в районе

контакта АБД с бетонной секцией № 34 в шпуночный колодец может доливаться асфальтовая мастика.

Конструкция примыкания асфальтобетонной диафрагмы к секции № 34 бетонной плотины показана на рисунке 2.

После начала наполнения водохранилища в 2012 г. контактный шов между АБД и секцией № 34 начал раскрываться, и отмечалась осадка АБД относительно секции № 34 бетонной плотины [12, 13], что также следует из соответствующих графиков, представленных на рисунках 3 и 4.

При достижении УВБ, равного пусковой отметке, рост ширины раскрытия контактного шва замедлился. В дальнейшем, начиная с 2014 г., когда уровень верхнего бьефа достиг НПУ, рост ширины раскрытия контактного шва продолжался с замедлением – по всей видимости, в результате продолжающейся осадки АБД, как следует из сопоставления содержания рисунков 3 и 4. По мере уменьшения интенсивности осадок уменьшилась и интенсивность роста ширины раскрытия контактного шва. Однако в настоящее время осадки нельзя назвать стабилизированными. При этом следует отметить,

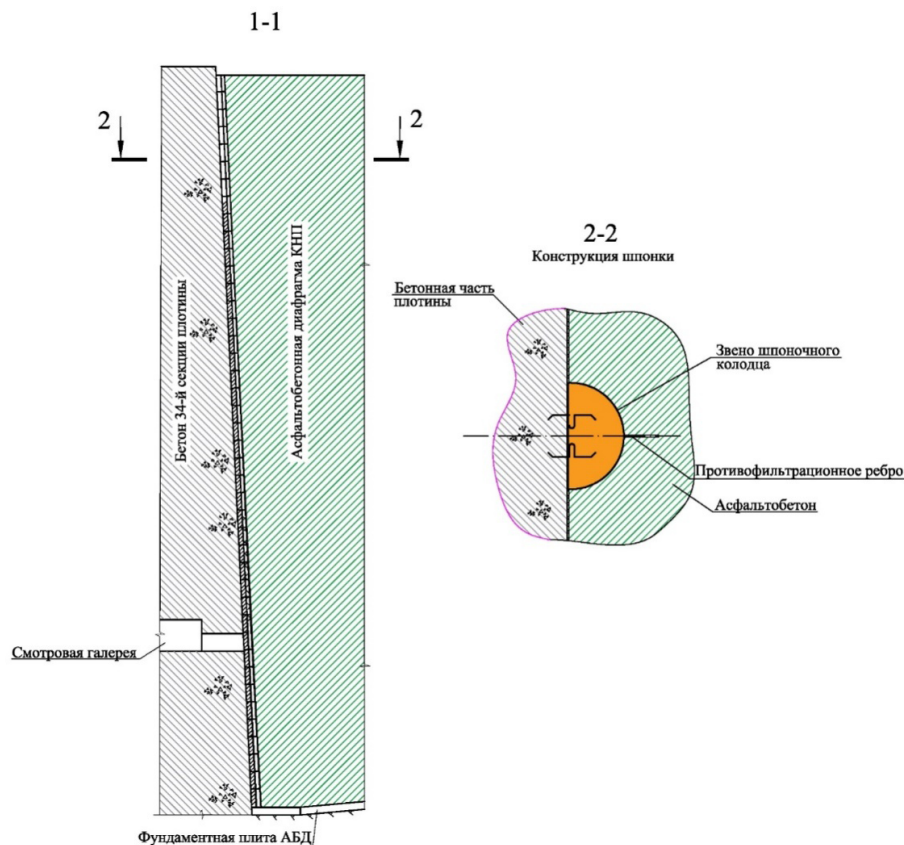


Рис. 2. Конструкция примыкания асфальтобетонной диафрагмы к секции № 34 бетонной плотины

Fig. 2. Structure of the asphalt concrete diaphragm junction with section No. 34 of the concrete dam



Рис. 3. Ширина раскрытия контактного шва между АБД и секцией № 34, мм

Fig. 3. The width of the contact seam opening between ABD and section No. 34, mm

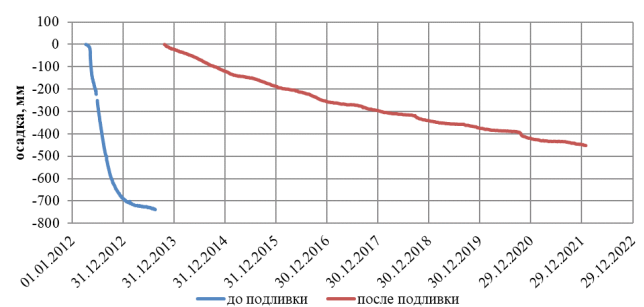


Рис. 4. Графики осадки АБД относительно секции № 34, мм

Fig. 4. Graphs of ABD settlement relative to section No. 34, mm

что в конце 2013 г. производились работы по замене штатива для измерения относительных смещений АБД и секции № 34, а также по подливке асфальтовой мастики в шахту до требуемого уровня. В конце 2013 г. наблюдения были возобновлены и начались с нуля.

Подводя итоги анализа влияния нагрузок и воздействий на ширину раскрытия контактного шва между секцией № 34 и АБД, можно прийти к выводу о том, что основной вклад в раскрытие контактного шва вносит осадка АБД и КНП (по маркам, установленным на бермах низовой упорной призмы) при наполнении водохранилища.

Важнейшим показателем состояния сопряжения бетонной плотины и КНП является ширина раскрытия контактного шва между АБД и бетонной секцией № 34.

Материалы и методы исследований. Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния сопряжения бетонной и каменно-набросной плотин Богучанской ГЭС проводились на основе конечно-элементного моделирования комплекса сооружений гидроузла в рамках вычислительного программного комплекса «ANSYS».

Для проведения расчетных исследований НДС сопряжения бетонной и каменно-набросной плотин была разработана пространственная постоянно действующая конечно-элементная модель «бетонная плотина (секции № 30-34) – участок каменно-набросной плотины – фрагмент скального основания», которая является неотъемлемой составной частью системы мониторинга. При моделировании грунтов участка КНП использовалась теория Кулона-Мора и упрочняющаяся модель «Soft Soil».

Пространственная конечно-элементная модель системы «бетонная плотина (секции № 30-34) – участок каменно-набросной плотины – фрагмент скального основания» представлена на рисунке 5.

Расчеты НДС сопрягающих секций бетонной плотины № 30, 31, 32, 33 и 34 и участка каменно-набросной плотины (протяженностью 180 м) выполнялись с учетом их поэтапного возведения в рамках 20 этапов (этапы № 1-20).

Наполнение водохранилища до отметки НПУ было смоделировано в рамках 29 расчетных этапов (№ 21-50). На этапах наполнения водохранилища и последующей эксплуатации до настоящего времени моделировалась температура воздуха и воды в водохранилище, а также положение уровней воды верхнего и нижнего бьефов в соответствии с графиками, представленными на рисунке 6.

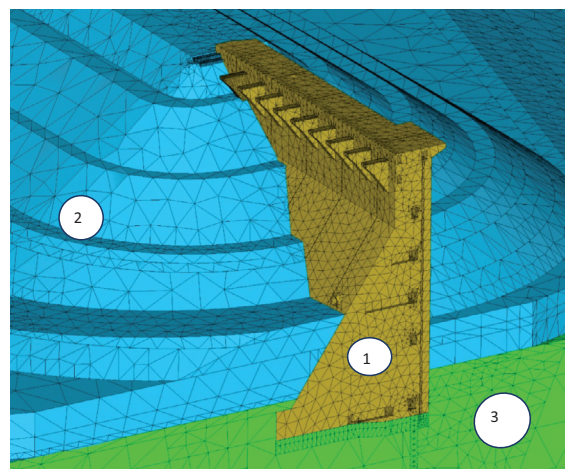


Рис. 5. Пространственная конечно-элементная модель системы «бетонная плотина (секции № 30-34) – участок каменно-набросной плотины – фрагмент скального основания» (фрагмент):
1 – сопрягающие секции бетонной плотины;
2 – участок каменно-набросной плотины;
3 – основание

Fig. 5. Spatial finite element model of the system “concrete dam (sections Nos. 30-34) – section of the rock-fill dam – a fragment of the rocky foundation” (fragment):
1 – connecting sections of the concrete dam;
2 – section of the rock-fill dam; 3 – base

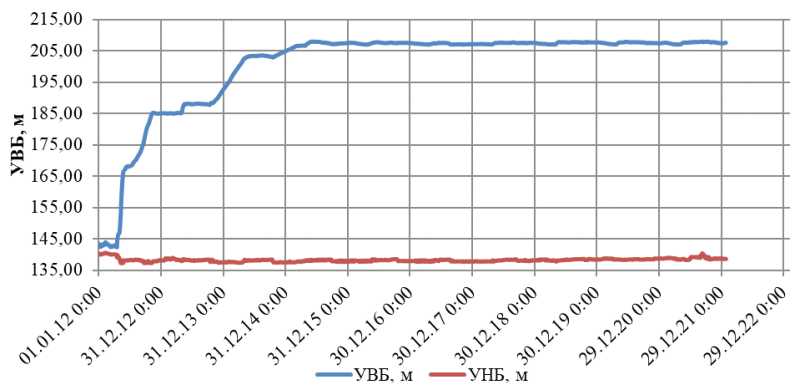


Рис. 6. Уровни воды верхнего и нижнего бьефов, м
Fig. 6. Upstream and downstream water levels, m

При моделировании особого сочетания нагрузок и воздействий учитывалось возможное нарушение работы дренажа, в том числе для года с минимальной среднемесячной температурой воздуха.

Нормативная сейсмичность района расположения Богучанской ГЭС в соответствии с положениями СП.14.13330.2018 составляет 6 баллов. Проведение расчетов при сейсмических воздействиях не потребовалось.

Результаты и их обсуждение. Анализ НДС сопряжения бетонной плотины с каменно-набросной плотиной был выполнен с учетом результатов проведенных расчетов на основе пространственной конечно-элементной модели сопряжения бетонной плотины с КНП. При этом на основе расчетов были получены значения осадок и горизонтальных смещений АБД, ширины раскрытия контактного шва между АБД и секцией № 34 бетонной плотины, которые связаны между собой.

На основной протяженности АБД (в сторону правобережного примыкания) расчетные значения осадки АБД достигают 621 мм. Имеются натурные данные, которые зафиксированы в другой зоне АБД. С момента начала наполнения водохранилища после переустановки планово-высотных пунктов осадка составила 146 мм. В процессе осадок АБД скользит по наклонной грани секции № 34 бетонной плотины, тем самым осадки в области сопряжения АБД и бетонной плотины меньше, чем на остальной протяженности, и составляют 64 мм. По результатам натурных наблюдений с начала 2017 г. после установки новых планово-высотных пунктов осадка АБД на пикете ПК12+01,68 (расположенном не рядом, а на удалении от примыкания АБД к бетонной плотине) составляет 146 мм.

Горизонтальные смещения поперек потока в районе контакта АБД и секции № 34 (весенний период) показаны в виде цветовых полей на рисунке 7.

При неравномерности осадки АБД и «зависании» ее на бетонной плотине они обуславливают раскрытие контактного шва между АБД и секцией № 34 бетонной плотины, величина которого фиксируется лазерным дальномером.

Расчетное значение ширины раскрытия контактного шва составляет 146 мм. При этом следует отметить, что замеренное значение ширины раскрытия этого шва составило 80 мм в начале 2013 г., а в настоящее время оно составляет 77 мм – после того, как в декабре 2013 г. измерения начались с нуля, то есть фактическая

суммарная ширина раскрытия контактного шва составляет 157 мм.

Сравнение расчетных значений ширины раскрытия контактного шва и измеренных значений после перемонтажа штатива и подливки асфальтовой мастики в шахту представлено на рисунке 8. Как следует из рисунка, натурные и расчетные данные хорошо согласуются друг с другом.

Критерием безопасности К1 для ширины раскрытия контактного шва «АБД-секция № 34 бетонной плотины» является равенство $1,5 \cdot \Delta Y_{i-1} = \Delta Y_i - 4\delta$. Превышением критерия К1 является выполнение неравенства $1,5 \cdot \Delta Y_{i-1} < \Delta Y_i - 4\delta$, где ΔY_i и ΔY_{i-1} – приращение показаний дальномера по оси Y за текущий и предшествующий циклы наблюдений соответственно; δ – погрешность измерения (1 мм).

Для последних циклов измерения имеем:

$$\Delta Y_i = +0,1 \text{ мм}, \Delta Y_{i-1} = -0,1 \text{ мм}.$$

Левая часть неравенства составляет $-0,15$ мм. Правая часть неравенства составляет $-3,9$ мм. Неравенство приобретает вид: $-0,15 \text{ мм} > -3,9 \text{ мм}$, то есть превышение критерия безопасности не отмечается.

Для инженерного персонала службы эксплуатации ГЭС разработанные критерии безопасности перевести в физические величины затруднительно.

Из анализа горизонтальных смещений вдоль потока можно сделать вывод о том, что основной вклад в эти смещения вносят осадки

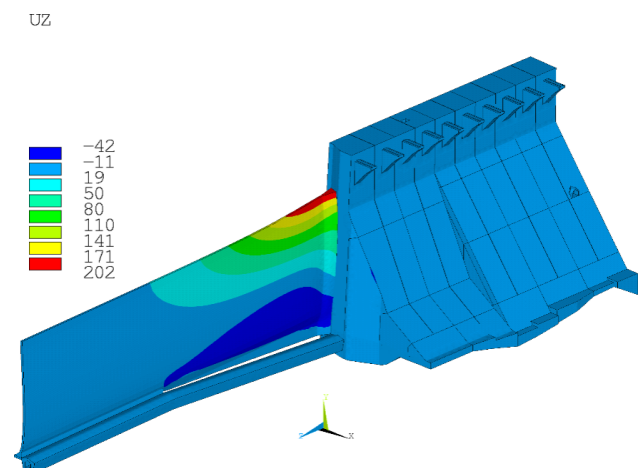


Рис. 7. Горизонтальные смещения, мм, поперек потока в области контакта АБД и секции № 34 при НПУ (основное сочетание нагрузок в весенний период)

Fig. 7. Horizontal displacements (mm) across the flow in the contact ABD area and section No. 34 at the NPU

(the main combination of loads in the spring period)



Рис. 8. Сопоставление расчетных и измеренных значений ширины раскрытия контактного шва между АБД и секцией № 34 после перемонтажа штатива и подливки асфальтовой мастики в шахту

Fig. 8. Comparison of calculated and measured values of the opening width of the contact joint between the ABD and section No. 34 after remounting the tripod and pouring asphalt mastic into the shaft

марок, установленных на бермах низовой упорной призмы КНП.

Водонепроницаемость контактного шва между АБД и секцией № 34 бетонной плотины обеспечивается за счет установленных латунных шпонок, проходящих по центру контактного шва «АБД – бетонная плотина» на всю высоту.

Выводы

1. Наиболее ответственным участком напорного фронта Богучанской ГЭС является сопряжение бетонной плотины с каменно-набросной плотинной. При этом особенностью Богучанской ГЭС является наличие противотрационного элемента – асфальтобетонной диафрагмы, которая выполняется по специальной технологии из литой гидротехнической асфальтобетонной смеси, укладываемой в разогретом состоянии.

2. Наиболее ярким показателем состояния сопряжения бетонной плотины и КНП является ширина раскрытия контактного шва между АБД и бетонной секцией № 34.

3. Для проведения расчетных исследований НДС сопряжения бетонной плотины и каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС была разработана пространственная постоянно действующая конечно-элементная модель «бетонная плотина (секции № 30-34) – участок каменно-набросной плотины – фрагмент скального основания», которая является неотъемлемой составной частью системы мониторинга.

4. Расчеты НДС сопряжения секций № 30-34 бетонной плотины и участка каменно-набросной плотины (протяженностью 180 м) выполнены на основе разработанной

и откалиброванной пространственной постоянно действующей конечно-элементной модели с учетом их поэтапного возведения, данных натурных наблюдений и отклонений от проектных предпосылок.

5. Основной вклад в раскрытие контактного шва между АБД и секцией № 34 бетонной плотины вносит деформация низовой упорной призмы КНП, отражаемая в виде роста осадок и горизонтальных смещений марок, установленных на бермах низовой упорной призмы КНП.

Расчетное значение ширины раскрытия контактного шва между АБД и секцией № 34 бетонной плотины составляет 146 мм. При этом замеренное значение ширины раскрытия этого шва составило 80 мм в начале 2013 г., а в настоящее время оно составляет 77 мм – после того, как в декабре 2013 г. измерения начались с нуля, то есть фактическая суммарная ширина раскрытия контактного шва составляет 157 мм.

Измеренные значения ширины раскрытия контактного шва не превышают критериев безопасности.

Для инженерного персонала службы эксплуатации ГЭС разработанные критерии безопасности перевести в физические величины затруднительно.

6. Представленные выше результаты не вызывают опасений, так как предусмотрена проектная система обогрева шпоночного колодца с асфальтовой мастикой, которая позволяет выполнить мероприятия по закрытию контактного шва. Состояние каменно-набросной плотины и асфальтобетонной диафрагмы на данный момент соответствует проектным предпосылкам.

Список использованных источников

1. Уточнение технических решений проекта Богучанской ГЭС с НПУ водохранилища 208,0 м. М.: ОАО «Институт Гидропроект», 2008.
2. Богучанская ГЭС на реке Ангаре. Уточнение технических решений проекта с НПУ 208,0 м в связи с изменением схемы электрических соединений на напряжении 220 кВ и 500 кВ в составе генерирующего объекта Богучанской ГЭС. Т. 1, 2. М.: Институт Гидропроект, 2010.
3. **Sainov M.P., Poslykhalin Y.A.** Asphaltic Concrete Cores of Embankment Dams: a Review; 2021; AlfaBuild; Vol. 18, № 1801. DOI: 10.34910/ALF.18.1.
4. **Дымант А.Н.** Особенности выполнения литых асфальтобетонных диафрагм грунтовых плотин при низких температурах / Касаткин Ю.Н., Кузнецов Е.И., Успенский В.В. // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2009. Т. 254. С. 59-65.
5. **Дымант А.Н., Кузнецов Е.И., Прокопович В.С.** Литые асфальтобетонные диафрагмы грунтовых плотин // Гидротехническое строительство. 2011. № 9. С. 47-54.
6. **Дымант А.Н., Кузнецов Е.И., Прокопович В.С.** Опыт возведения литой асфальтобетонной диафрагмы каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС // Гидротехника XXI век. 2012. № 5 (12). С. 20-25.
7. **Feng S., Wang W., Hu W., Deng Y., Yang J., Wu S., Zhang C., Höeg K.** Design and performance of the Quxue asphalt-core rockfill dam // Soils and Foundations. 2020. № 60 (4). Pp. 1036-1049. DOI: 10.1016/j.sandf.2020.06.008.
8. **Uspenskii V.V., Kuznetsov E.I.** Analysis and prediction of asphalt-concrete core wall settlement of the Boguchany HPP rockfill dam during the period of construction completion // Power Technology and Engineering. 2017. № 50 (5). Pp. 501-505. DOI: 10.1007/s10749-017-0739-6.
9. **Wang Z., Hao J., Yang J., Cao Y., Li X., Liu S.** Experimental study on hydraulic fracturing of high asphalt concrete core rock-fill dam. Applied Sciences (Switzerland). 2019. № 9 (11). Pp. 1-17. DOI: 10.3390/app9112285.
10. **Gao J., Dang F., Ma Z.** ScienceDirect Investigation for the key technologies of ultra-high asphalt concrete core rockfill dams // Soils and Foundations. 2019. № 59 (6). P. 17401757. DOI: 10.1016/j.sandf.2019.07.013. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.07.013>.
11. **Gao J., Dang F., Ma Z., Xue Y., Ren J.** Improvement Methods for Reduction of the High Stress of Ultra-High Asphalt Concrete Core Dams // Applied sciences. Oct. 2019. № 9 (21). P. 4618. DOI: 10.3390/app9214618.
12. **Вольтычиков 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.
13. **Баклыков И.В.** Анализ поведения сопряжения бетонной и каменно-набросной плотин Богучанской ГЭС в период наполнения // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2014. № 273. С. 84-95.

References

1. Clarification of technical solutions of the project of the Boguchanskaya HPP with the NPU of the reservoir of 208.0 m. Moscow: OAO "Institute Hydroproject", 2008.
2. Boguchanskaya Hydroelectric Power Plant on the Angara River. Clarification of the technical solutions of the project with a 208.0 m NPU due to a change in the electrical connection scheme at 220 kV and 500 kV as part of the generating facility of the Boguchanskaya HPP. T/ 1-2. Moscow: Institute Hydroproject, 2010.
3. **Sainov M.P.; Poslykhalin Y.A.** Asphaltic Concrete Cores of Embankment Dams: a Review; 2021; AlfaBuild; Volume 18 Article No 1801. doi: 10.34910/ALF.18.1
4. **Dymant A.N.** Features of the performance of cast asphalt concrete diaphragms of ground dams at low temperatures / Kasatkin Yu.N., Kuznetsov E.I., Uspenskiy V.V. // Izvestiya of VNIIG named after B.E. Vedeneev. 2009. V. 254. P. 59-65.
5. **Dymant A.N., Kuznetsov E.I., Prokopovich V.S.** Cast asphalt concrete diaphragms of ground dams. // Hydraulic engineering construction. 2011. № 9. P. 47-54.
6. **Dymant A.N., Kuznetsov E.I., Prokopovich V.S.** Experience in the construction of a cast asphalt concrete diaphragm of the stone-fill dam of the Boguchanskaya hydroelectric power plant // Hydrotechnics of the XXI century. 2012. № 5 (12). P. 20-25.
7. **Feng S., Wang W., Hu W., Deng Y., Yang J., Wu S., Zhang C., Höeg K.** Design and performance of the Quxue asphalt-core rockfill dam. Soils and Foundations. 2020. 60(4). Pp. 1036-1049. DOI: 10.1016/j.sandf.2020.06.008.
8. **Uspenskii V.V., Kuznetsov E.I.** Analysis and prediction of asphalt-concrete core wall settlement of the Boguchany HPP rockfill dam during the period of construction completion. Power Technology and Engineering. 2017. 50(5). Pp. 501-505. DOI: 10.1007/s10749-017-0739-6.
9. **Wang Z., Hao J., Yang J., Cao Y., Li X., Liu S.** Experimental study on hydraulic fracturing of high asphalt concrete core rock-fill dam. Applied Sciences (Switzerland). 2019. 9(11), P. 1-17. DOI: 10.3390/app9112285.
10. **Gao J., Dang F., Ma Z.** ScienceDirect Investigation for the key technologies of ultra-high asphalt concrete core rockfill dams. Soils and Foundations. 2019. 59(6). P. 1740-1757. DOI: 10.1016/j.sandf.2019.07.013. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.07.013>.
11. **Gao J., Dang F., Ma Z., Xue Y., Ren J.** Improvement Methods for Reduction of the High Stress of Ultra-High Asphalt Concrete Core Dams. Oct. 2019. Applied sciences 9(21):4618. DOI: 10.3390/app9214618.
12. **Volynchikov A.N., Gaziev E.G.** Behavior of the concrete and rock-fill dams of the Boguchanskaya hydroelectric power plant during the period of filling the reservoir (2012-2015) // Hydrotechnical construction. 2015. № 12. P. 13-23.
13. **Baklykov I.V.** Analysis of the behavior of the conjugation of concrete and rock-fill dams of the Boguchanskaya Hydroelectric Power Plant in the period of filling // Proceedings of the All-Russian scientific research institute of hydraulic engineering named after B.E. Vedeneev. 2014. № 273. P. 84-95.

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 филиала АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС», профессор НИУ МГСУ; SPIN-код: 2720-6627, AuthorID: 423001, Scopus: 7004427140, Researcher ID: AAE-6688-2022, ORCID: 0000-0002-0630-3251, o.rubin@hydroproject.ru

Сергей Владимирович Юрьев, инженер, заместитель главного инженера по основным сооружениям АО «Институт Гидропроект»; ORCID: 0000-0002-2609-2711; s.yurev@hydroproject.ru

Сергей Евгеньевич Лисичкин, д-р техн. наук, главный специалист филиала АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС», SPIN-код: 5423-0643, AuthorID: 368472, Scopus: 6603919071, ORCID: 0000-0003-2761-331X, lisichkin1989@rambler.ru

Игорь Вячеславович Баклыков, инженер, ведущий специалист филиала АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС», SPIN-код: 7987-9045, AuthorID: 915462, Scopus: 56538614100, ORCID: 0000-0002-8374-9046, 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 теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Вклад авторов

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

Статья поступила в редакцию / The article was submitted to the editorial office 27.10.2023

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 10.12.2023

Принята к публикации / Accepted for publication 15.12.2023

Author information

Evgeniy N. Bellendir, Doctor of Technical Sciences, General director of JSC "Institute Hydroproject"; SPIN code: 7975-2841, AuthorID: 272223; e.bellendir@hydroproject.ru

Oleg D. Rubin, Doctor of Technical Sciences, Director of the branch of JSC "Institute Hydroproject" – "NIIES", Professor of the National Research University MGSU; SPIN code: 2720-6627, AuthorID: 423001, Scopus: 7004427140, Researcher IDAAE-6688-2022, ORCID: 0000-0002-0630-3251, o.rubin@hydroproject.ru

Sergey V. Yuriev, Engineer, Deputy Chief Engineer for main structures, Institute Hydroproject; ORCID: 0000-0002-2609-2711; s.yurev@hydroproject.ru

Sergey E. Lisichkin, doctor of technical science, chief specialist of the branch of JSC "Institute Hydroproject" – "NIIES", SPIN-code: 5423-0643, AuthorID: 368472, Scopus: 6603919071, ORCID: 0000-0003-2761-331X, lisichkin1989@rambler.ru

Igor V. Baklykov, Engineer, Leading Specialist of the branch of JSC "Institute Hydroproject" – "NIIES", SPIN-code: 7987-9045, AuthorID: 915462, Scopus: 56538614100, ORCID: 0000-0002-8374-9046, i.baklykov@hydroproject.ru

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