



DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-5-428-437

УДК 626/693.5

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

## Особенности состояния фундаментной плиты водоприемника гидроаккумулирующей электростанции

С.Е. Лисичкин  , С.С. Котицына 

Филиал АО «Институт „Гидропроект“» – «НИИЭС», Москва, Российская Федерация

 Lisichkin1989@rambler.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 8 июля 2022 г.

Доработана: 23 сентября 2022 г.

Принята к публикации: 28 сентября 2022 г.

### Для цитирования

Лисичкин С.Е., Котицына С.С. Особенности состояния фундаментной плиты водоприемника гидроаккумулирующей электростанции // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 5. С. 428–437. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-5-428-437>

**Аннотация.** Представлены результаты анализа данных натуральных наблюдений за состоянием фундаментной плиты водоприемника ГАЭС (в том числе за напряжениями в арматуре в зонах пересечения с вертикальными межблочными швами и шириной раскрытия этих швов). Цель исследования заключалась в контроле состояния железобетонной конструкции фундаментной плиты водоприемника гидроаккумулирующей электростанции, а также в разработке мероприятий по усилению низового участка фундаментной плиты в зонах вертикальных межблочных швов. В целях контроля напряженно-деформированного состояния фундаментной плиты водо-приемника ГАЭС установлена струнная контрольно-измерительная аппаратура: на арматурных стержнях – арматурные динамометры ПСАС, на вертикальных межблочных швах – датчики перемещений ПЛПС. Данные натуральных наблюдений за напряженным состоянием арматуры фундаментной плиты водоприемника ГАЭС показали, что в арматурных стержнях (направленных вдоль потока), пересекающих низовые вертикальные межблочные швы, возникли высокие значения растягивающих напряжений, превышающие расчетное сопротивление арматуры класса А500С (435 МПа). Также зафиксирована ширина раскрытия вертикального межблочного шва, достигающая 1,28 мм. Возникла необходимость усиления низового участка фундаментной плиты водоприемника ГАЭС. Для этого были установлены наклонные арматурные стержни (анкеры), пересекающие низовые вертикальные межблочные швы. Выполнено наращивание выходных участков контрфорсов перекрытия низового участка водоприемника до низового парапета.

**Ключевые слова:** водоприемники ГАЭС, фундаментная плита, вертикальные межблочные швы, напряжения, арматура, ширина раскрытия швов, усиление фундаментной плиты

Лисичкин Сергей Евгеньевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, филиал АО «Институт „Гидропроект“» – «НИИЭС», Российская Федерация, 125080, Москва, Волоколамское шоссе, д. 2; ORCID: 0000-0003-2761-331X; Scopus Author ID: 6603919071, eLIBRARY SPIN-код: 5423-064; lisichkin1989@rambler.ru

Котицына Софья Сергеевна, аспирант, старший инженер, филиал АО «Институт „Гидропроект“» – «НИИЭС», Российская Федерация, 125080, Москва, Волоколамское шоссе, д. 2; ORCID: 0000-0002-5704-4819, Scopus Author ID: 57226198174, eLIBRARY SPIN-код: 8426-8151; hamlenon@mail.ru

© Лисичкин С.Е., Котицына С.С., 2022



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

## Peculiarities of the condition of the foundation slab of the pumped storage power plant water intake

Sergey E. Lisichkin  , Sofya S. Kotitsyna 

Branch of JSC “Institute ‘Hydroproject’” – “NIIES”, Moscow, Russian Federation

 Lisichkin1989@rambler.ru

### Article history

Received: July 8, 2022

Revised: September 23, 2022

Accepted: September 28, 2022

### For citation

Lisichkin S.E., Kotitsyna S.S. Peculiarities of the condition of the foundation slab of the pumped storage power plant water intake. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(5):428–437. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-5-428-437>

**Abstract.** The authors present the results of the analysis of field observations of the condition of the base slab of the water intake structure of hydroelectric power plant (including the stresses in the reinforcement in the areas of intersection with the vertical joints and the width of the opening of these joints). The aim of the study is to control the condition of the reinforced concrete structure of the foundation slab of the water inlet of the hydroelectric power plant, as well as to develop measures to strengthen the bottom section of the foundation slab in the areas of vertical interblock joints. In order to control the stress and strain of the base plate of the water intake of hydroelectric power plant, string control and measuring equipment was installed: on reinforcement rods – reinforcement dynamometers PSAS, on vertical interblock joints – displacement sensors PLPS. The field observations of the stress state of the reinforcement of the base slab of the water intake structure of hydroelectric power station showed that high values of tensile stresses, exceeding the design resistance of A500C class reinforcement (435 MPa), occurred in the reinforcement rods (directed along the flow), crossing the lower vertical interblock joints. There was also fixed the width of opening of the vertical interblock joint, reaching 1.28 mm. There was a necessity to strengthen the lower section of the foundation slab of the water intake structure of hydroelectric pumped storage power plant. For this purpose, inclined reinforcing bars (anchors) crossing the lower vertical interblock joints were installed. The outlet sections of the buttresses of the slab of the downstream section of the inlet to the downstream parapet were increased.

**Keywords:** water intakes, hydroelectric power plant, foundation slab, vertical interblock joints, stresses, reinforcement, width of joints opening, foundation slab

### Введение

Водоприемники являются важнейшими напорными сооружениями гидроузлов [1–6]. От их состояния зависит безопасность гидроузлов в целом, которая должна обеспечиваться на соответствующем уровне<sup>1</sup>. Однако имеются случаи отклонений в поведении водоприемников ГАЭС от проектных предположений, в том числе описанные зарубежными учеными [7; 8].

Так, отмечаются случаи высоких значений растягивающих напряжений в арматуре фундаментной плиты, направленной вдоль потока, в зонах пересечения с вертикальными межблочными швами. При этом в арматуре, расположенной у нижней грани фундаментной плиты, пересекающей низовой вертикальный межблочный шов, напряжения достигли предела текучести; а в арматуре, пересекающей средний шов на низовой половине фундаментной плиты, расположенной как у верхней так и у нижней граней, растягивающие напряжения достигли расчетного значения сопротивления арматуры (то есть отмечается практически центральное растяжение).

Также отмечается значительная ширина раскрытия вертикальных межблочных швов (между соседними блоками бетонирования фундаментной плиты), превышающая предельные величины, установленные нормами.

*Sergey E. Lisichkin*, Doctor of Technical Sciences, chief researcher, branch of JSC “Institute ‘Hydroproject’” – “NIIES”, 2 Volokolamskoye Shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2761-331X, Scopus Author ID: 6603919071, eLIBRARY SPIN-code: 5423-064; lisichkin1989@rambler.ru  
*Sofya S. Kotitsyna*, postgraduate student, senior engineer, branch of JSC “Institute ‘Hydroproject’” – “NIIES”, 2 Volokolamskoye Shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5704-4819, Scopus Author ID: 57226198174, eLIBRARY SPIN-code: 8426-8151; hamillennon@mail.ru

<sup>1</sup> Федеральный закон от 21.07.1997 г. № 177-ФЗ (ред. от 01.01.2022 г.) «О безопасности гидротехнических сооружений» // Собрание законодательства РФ. 2021. № 24. Ст. 4188.

В этой связи потребовалось проведение мероприятий по усилению фундаментной плиты водоприемника в зонах вертикальных межблочных швов.

Требуется совершенствование конструкции водоприемников ГАЭС, в том числе фундаментной плиты. При этом был учтен зарубежный опыт исследований железобетонных конструкций гидросооружений [9–13].

### Конструктивные особенности водоприемника гидроаккумулирующей электростанции

Водоприемник ГАЭС расположен перед склоном в восточной части верхнего аккумулирующего бассейна и представляет собой неразрезную железобетонную конструкцию, включающую четыре водопроводящие галереи и башню управления затворами. Высота водоприемника составляет 48 м, ширина вдоль потока 63,15 м, длина поперек потока 78,7 м. В состав сооружений водоприемника также входят:

- железобетонный понур в верхнем бьефе;
- подпорные стены подводящего канала I яруса (секции ЛВ, ПВ);
- сопрягающие подпорные стены II яруса (секции ЛС, ПС);
- нижние подпорные стены напорных водоводов (секции ЛН, ПН).

Основанием водоприемника до глубины 30–35 м служат мореные суглинки с прослоями песков и песчано-гравийных грунтов. Под толщей морены залегает пачка (25–30 м) внутриморенных песков.

Вид водоприемника в плане представлен на рис. 1.

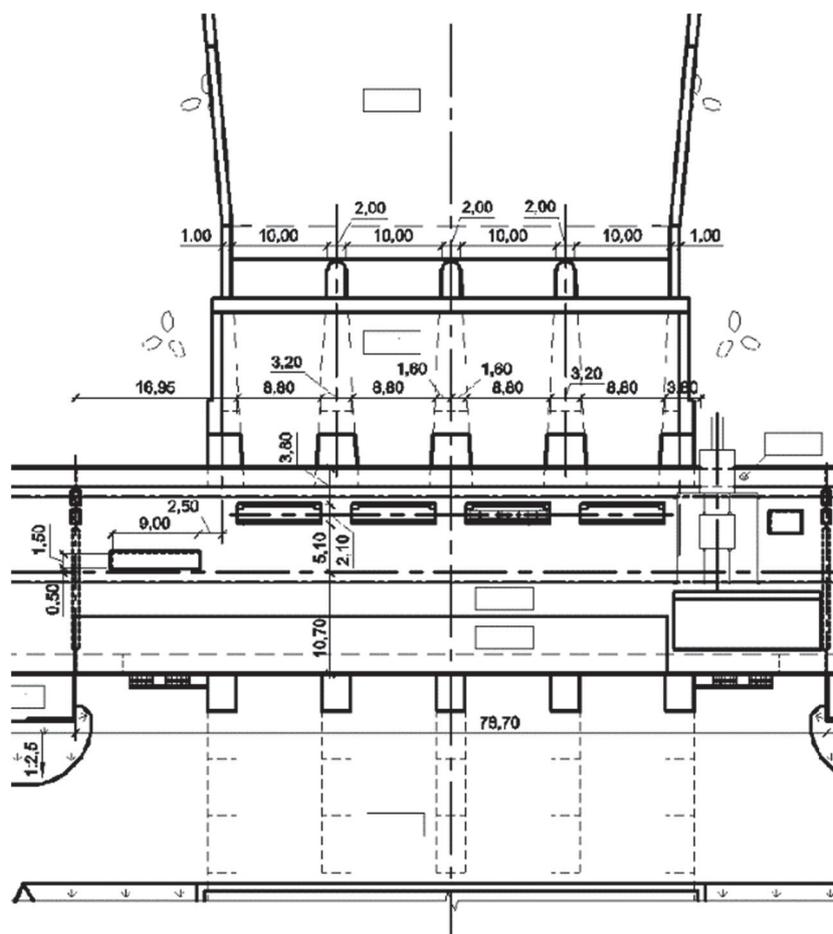
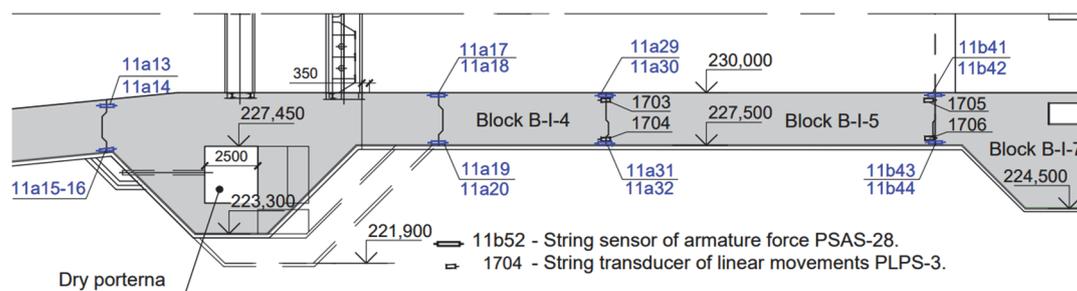


Рис. 1. Вид водоприемника ГАЭС в плане  
Figure 1. View of the water intake of the pumped storage power plant

Конструкция водоприемника в вертикальном разрезе вдоль потока представлена на рис. 2.

Как отмечено выше, конструкция водоприемника – неразрезная. Армирование конструкций водоприемника выполнено арматурой класса А500С. Для уменьшения напряжений, возникающих при сезонном колебании температур, стены здания машинного зала вместе с контрфорсами, выше отметки пола машзала (246,75 м) и его перекрытие, надрезаны двумя вилочными швами через 24 м.





**Figure 3.** Layout of the instrumentation in the foundation slab, showing the numbers of the concreting blocks

Для контроля напряженно-деформированного состояния фундаментной плиты водоприемника в ней была установлена струнная контрольно-измерительная аппаратура.

На арматурных стержнях фундаментной плиты установлены преобразователи силы арматуры струнные ПСАС для измерения напряжений в арматуре. На вертикальных межблочных швах установлены преобразователи линейных перемещений струнные ПЛПС для измерения ширины раскрытия швов. Схема размещения контрольно-измерительной аппаратуры представлена на рис. 3.

### Результаты

Ниже приводятся наиболее существенные результаты натуральных наблюдений за состоянием фундаментной плиты водоприемника.

Напряжения в арматуре, расположенной вдоль потока у нижней и у верхней грани фундаментной плиты водоприемника, преимущественно растягивающие.

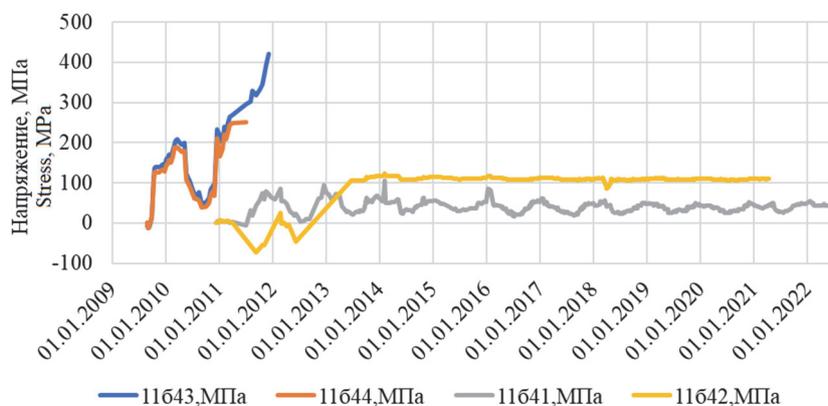
С начала 2011 г. был зафиксирован неуклонный рост растягивающих напряжений (по прибору ПСАС 11643) в продольной арматуре у нижней грани, пересекающей низовой вертикальный шов между блоками Б-І-5 и Б-І-7 (рис. 3). После достижения (к началу 2012 г.) напряжений более 400 МПа, прибор ПСАС 11643 перестал давать показания. Расположенный поблизости дублирующий прибор ПСАС 11644 после достижения значений 250 МПа в первом квартале 2011 г. перестал давать показания.

По показаниям приборов ПСАС 11641 и ПСАС 11642, расположенных на арматуре вдоль потока у верхней грани, пересекающей тот же вертикальный шов между блоками Б-І-5 и Б-І-7 (рис. 4), растягивающие напряжения в арматуре не превышают 100 МПа.

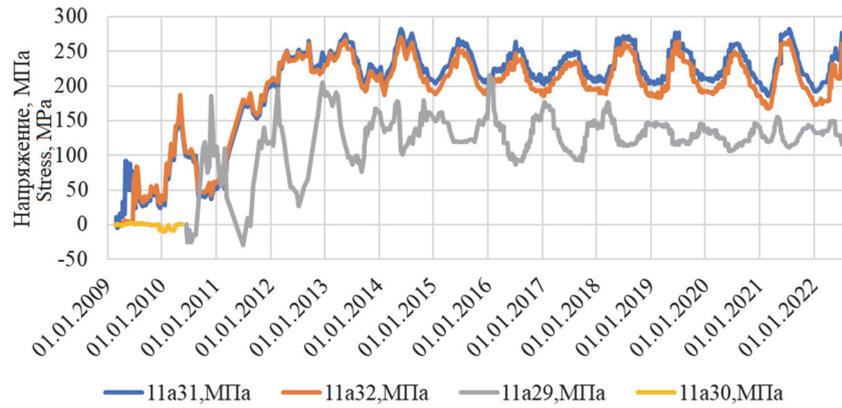
Таким образом, вертикальный шов между блоками Б-І-5 и Б-І-7 (рис. 3) находится в условиях внецентренного растяжения с большим эксцентриситетом, близкого к изгибу.

В вертикальном шве между блоками Б-І-4 и Б-І-5 (рис. 3) отмечается картина, представленная графически на рис. 5.

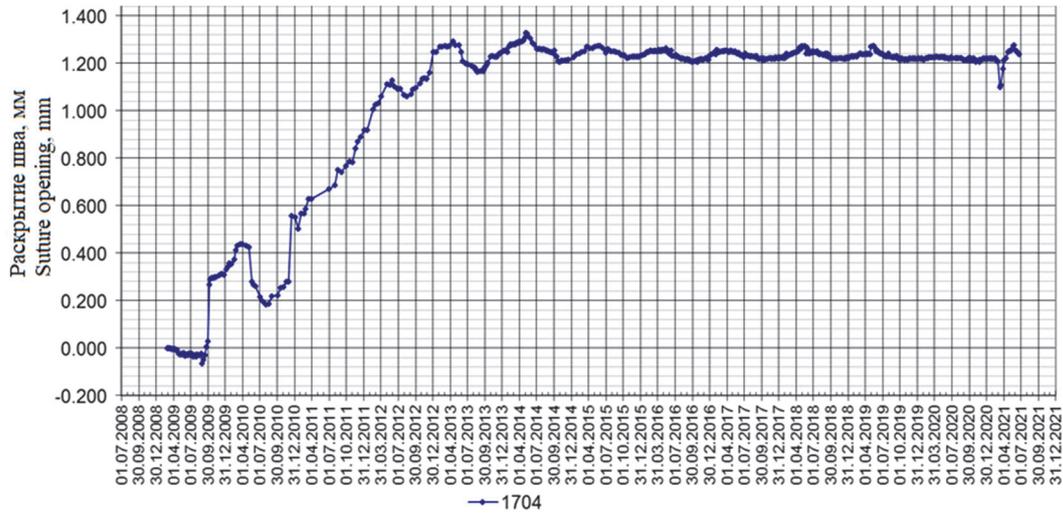
Максимальные растягивающие напряжения в арматуре вдоль потока зафиксированы по прибору ПСАС 11a31, расположенному на арматуре нижней грани фундаментной плиты, и составляют 276,77 МПа. По дублирующему прибору ПСАС 11a32 зафиксированы практически такие же показания.



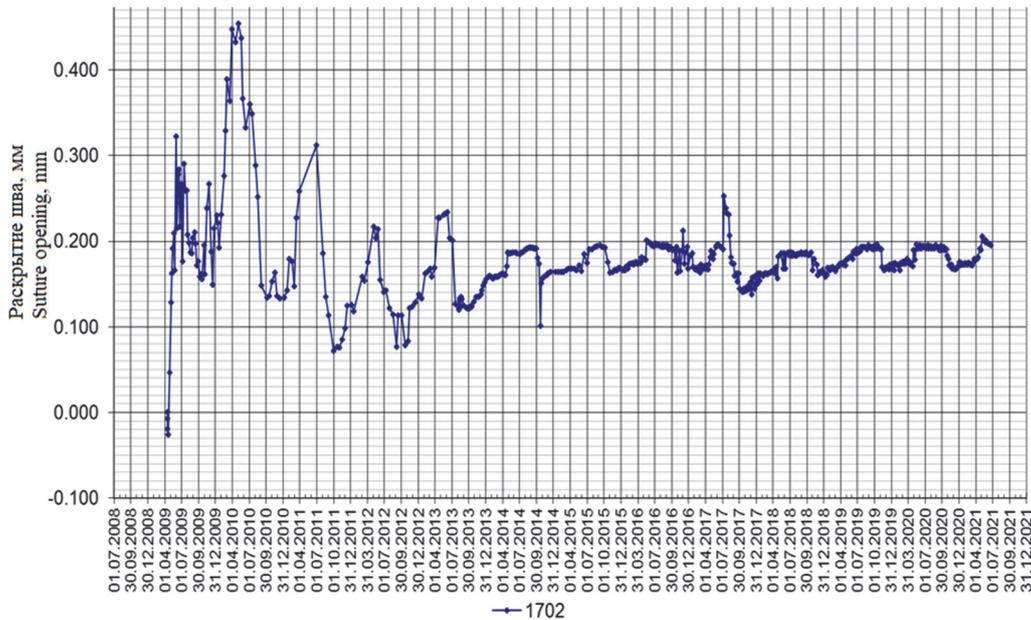
**Рис. 4.** Напряжения в арматуре вдоль потока, пересекающей вертикальный шов между блоками Б-І-5 и Б-І-7  
**Figure 4.** Stresses in the reinforcement along the stream crossing the vertical joint between blocks B-I-5 and B-I-7



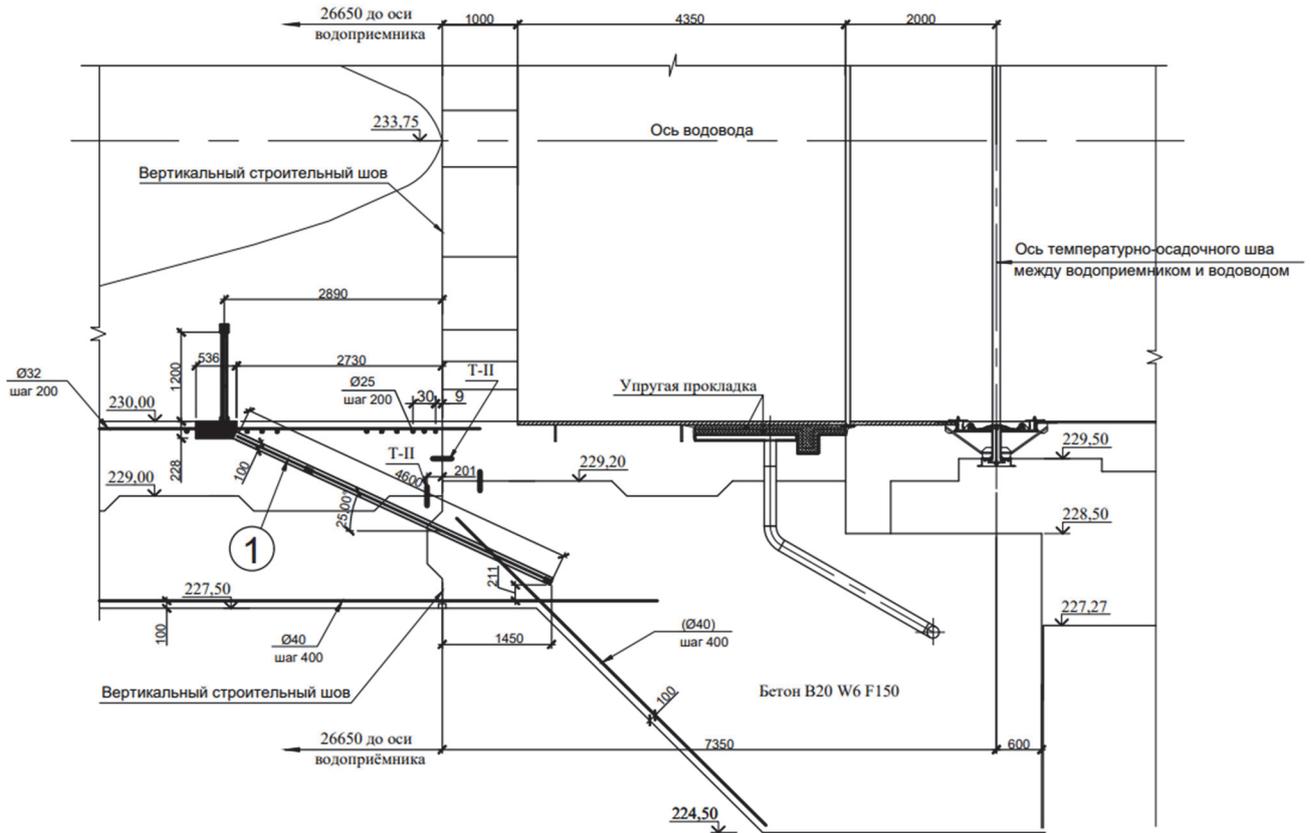
**Рис. 5.** Напряжения в арматуре вдоль потока, пересекающей вертикальный шов между блоками Б-I-4 и Б-I-5  
**Figure 5.** Stresses in the reinforcement along the stream crossing the vertical joint between blocks B-I-4 and B-I-5



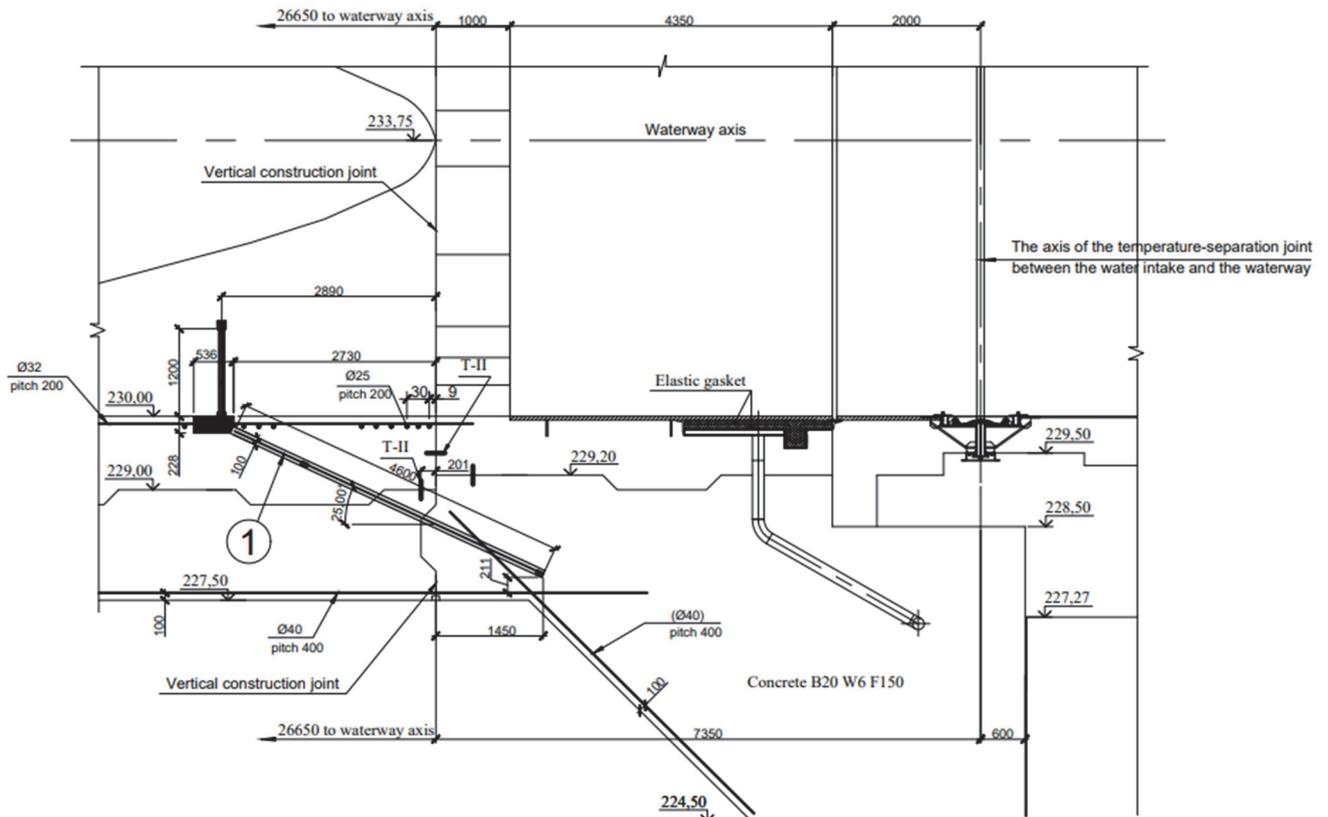
**Рис. 6.** Ширина раскрытия вертикального шва между блоками Б-I-4 и Б-I-5 на нижней грани фундаментной плиты  
**Figure 6.** Width of vertical joint opening between blocks B-I-4 and B-I-5 on the bottom face of the foundation slab



**Рис. 7.** Ширина раскрытия вертикального шва между блоками Б-I-4 и Б-I-5 на верхней грани фундаментной плиты  
**Figure 7.** Width of opening of the vertical joint between blocks B-I-4 and B-I-5 on the top edge of the foundation slab



**Рис. 8.** Схема усиления низового участка фундаментной плиты наклонными стержнями (анкерами):  
1 – наклонные стержни (анкеры) из арматуры Ø 40 мм класса А500С



**Figure 8.** Scheme of strengthening the bottom section of the foundation slab with inclined rods (anchors):  
1 – inclined rods (anchors) made of reinforcement Ø 40 mm of class А500С

По прибору ПСАС 11a29, расположенному на арматуре верхней грани фундаментной плиты, напряжения составляют около 150 МПа.

Таким образом, вертикальный шов между блоками Б-I-4 и Б-I-5 (см. рис. 3) находится в условиях растяжения, близкого к центральному.

Раскрытие межблочных швов фундаментной плиты соответствует сезонному изменению температуры, однако стоит отметить повышенную ширину раскрытия строительного шва до 1,28 мм на нижней грани фундаментной плиты между блоками Б-I-4 и Б-I-5 (см. рис. 3) по состоянию на II квартал 2021 г., согласно показаниям прибора ПЛПС 1704 (см. рис. 6). На верхней грани в этом же шве ширина раскрытия по показаниям ПЛПС 1703 не превышает 0,3 мм (см. рис. 7).

В конце 2012 г. был разработан (а в начале 2013 г. был реализован) проект усиления низового участка фундаментной плиты водоприемника в зонах низовых вертикальных швов между блоками А-I-5 и А-I-7, Б-I-5 и Б-I-7, В-I-5 и В-I-7, Г-I-5 и Г-I-7, посредством дополнительных наклонных арматурных стержней диаметром 40 мм класса А500С (рис. 8). Также было выполнено наращивание выходных участков контрфорсов перекрытия низового участка водоприемника до низового парапета с целью повысить изгибную жесткость низового участка водоприемника (рис. 9).

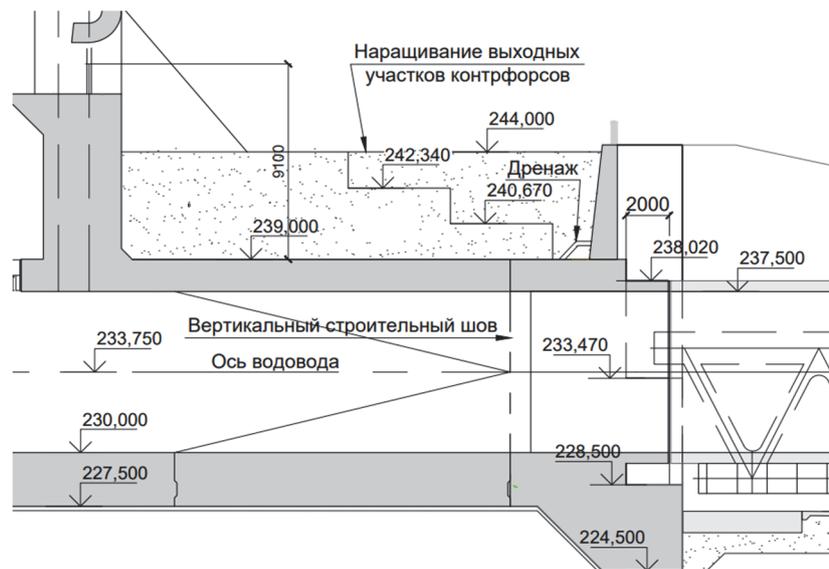


Рис. 9. Схема усиления низового участка водоприемника путем наращивания выходных участков контрфорсов

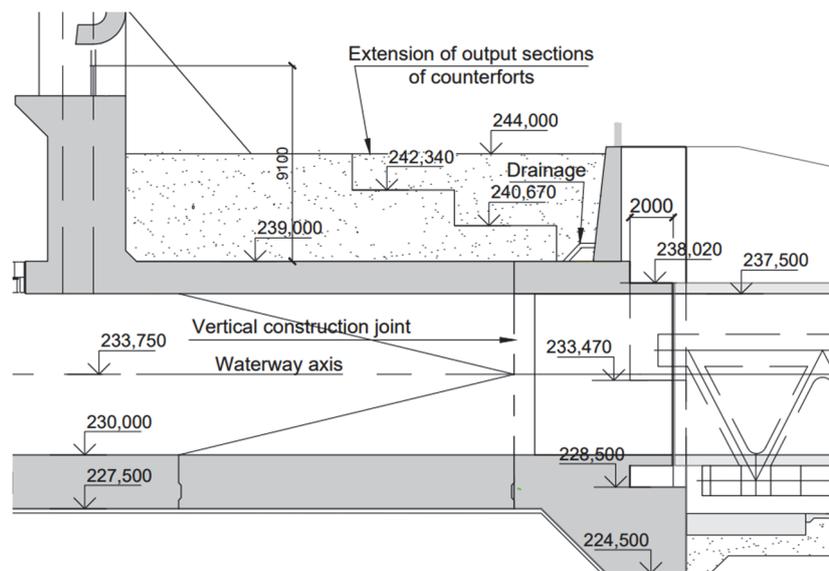
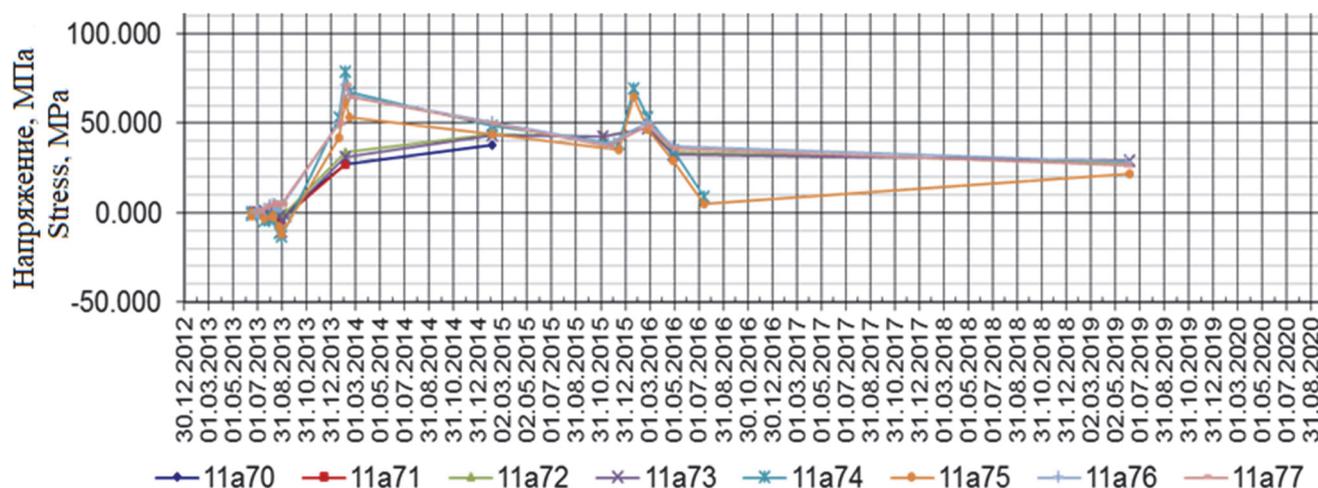


Figure 9. Scheme of strengthening the downstream section of the inlet by extending the outlet sections of the buttresses



**Рис. 10.** Растягивающие напряжения в дополнительных наклонных арматурных стержнях (анкерах) в зонах швов между блоками А-I-5 и А-I-7, В-I-5 и В-I-7, В-I-5 и В-I-7, Г-I-5 и Г-I-7  
**Figure 10.** Tensile stresses in additional inclined reinforcing bars (anchors) in the areas of joints between blocks А-I-5 and А-I-7, В-I-5 and В-I-7, В-I-5 and В-I-7, Г-I-5 and Г-I-7

В дополнительных наклонных арматурных стержнях (анкерах) длиной 4,6 м, установленных для усиления фундаментной плиты в зонах швов между блоками А-I-5 и А-I-7, В-I-5 и В-I-7, В-I-5 и В-I-7, Г-I-5 и Г-I-7 под углом  $25^\circ$ , растягивающие напряжения достигли 70 МПа в 2014–2015 гг. и в 2019 г. снизились до 20–30 МПа, после чего не представлялось возможным снимать показания (рис. 10).

В целом напряжения в дополнительных наклонных арматурных стержнях (анкерах) растягивающие – это значит, что наклонные стержни включились в статическую работу фундаментной плиты.

Анализ данных натурных наблюдений за состоянием фундаментной плиты водоприемника показал, что имелись определенные недоработки при проектировании водоприемника, что потребовало проведения мероприятий по усилению низового участка фундаментной плиты. Требуется совершенствование конструкции водоприемника данного типа, в том числе конструкции фундаментной плиты водоприемника.

### Заключение

Данные натурных наблюдений за состоянием фундаментной плиты водоприемника ГАЭС показали, что в арматуре, направленной вдоль потока (в зонах пересечения вертикальных швов), возникли растягивающие напряжения, превышающие расчетное сопротивление арматуры класса А500С (435 МПа). Имеется опасение, что нижняя арматура, пересекающая низовой шов фундаментной плиты между блоками В-I-5 и В-I-7 (см. рис. 3), находится в состоянии текучести.

Данные натурных наблюдений за состоянием фундаментной плиты водоприемника показали, что имеются случаи ширины раскрытия вертикальных швов, достигающей 1,28 мм.

По данным натурных наблюдений установлено, что вертикальный шов между блоками В-I-5 и В-I-7 (см. рис. 3) находится в условиях внецентренного растяжения с большим эксцентриситетом, близкого к изгибу; а вертикальный шов между блоками В-I-4 и В-I-5 (см. рис. 3) находится в условиях растяжения, близкого к центральному растяжению.

Состояние фундаментной плиты водоприемника потребовало проведения мероприятий по усилению низового участка фундаментной плиты водоприемника ГАЭС.

Конструкция водоприемника ГАЭС (в части фундаментной плиты) нуждается в совершенствовании.

Рекомендуется выполнить дополнительное усиление низовой половины фундаментной плиты водоприемника в зонах вертикальных межблочных швов, направленных поперек потока, предварительно напряженной композитной арматурой (например, базальтокомпозитной арматурой).

### References / Список литературы

1. Serebrynikov N.I., Rodionov V.G., Kuleshov A.P., Magruk V.I., Ivanushchenko V.S. *Pumped storage power plants. Construction and operation of Zagorskaya Hydroelectric Power Plant*. Moscow: NTS ENAS Publ.; 2000. (In Russ.)  
Серебряников Н.И., Родионов В.Г., Кулешов А.П., Магрук В.И., Иванущенко В.С. Гидроаккумулирующие электростанции. Строительство и эксплуатация Загорской ГАЭС. М.: НЦ ЭНАС, 2000. 355 с.
2. Sinyugin V.Yu., Magruk V.I., Rodionov V.G. *Pumped-storage power stations in the modern power engineering*. Moscow: NTS ENAS Publ.; 2008. (In Russ.)  
Синюгин В.Ю., Магрук В.И., Родионов В.Г. Гидроаккумулирующие электростанции в современной электроэнергетике. М.: НЦ ЭНАС, 2008. 352 с.
3. Barbour E., Wilson I.A., Radcliffe J. A review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;61:421–432. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.019>
4. Kwak H.G., Ha S.J., Kim J.K. Non-structural cracking in RC walls. Part I. Finite element formulation. *Cement and Concrete Research*. 2006;36(4):749–760. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.001>
5. Isgor O.B., Razaqpur A.G. Finite element modeling of coupled heat transfer, moisture transport and carbonation processes in concrete structures. *Cement and Concrete Composites*. 2004;26(1):57–73. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00125-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00125-7)
6. Antal B.A. *Pumped storage hydropower: a technical review* (Master's report). Boulder: University of Colorado; 2014.
7. Tàczy I. *Pumped storage hydroelectric power plants: issues and applications*. Budapest: Energy Regulators Regional Association; 2016.
8. Barth C., Margraf E. Untersuchung verschiedener Bodenmodelle zur Berechnung von Fundamentplatten im Rahmen von FEM-Lösungen. *Bautechnik*. 2004;81(5):337–343.
9. Burland J.B., Broms B.B., De Mello V.F.B. Behaviour of foundations and structures. *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Tokyo, 1977)*. 1977;2:495–546.
10. Klucka R., Frydrysek K., Mahdal M. Measuring the deflection of a circular plate on an elastic foundation and comparison with analytical and FE approaches. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;684:407–412. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.684.407>
11. Haldar A., Mahadevan S. *Probability, reliability and statistical methods in engineering design*. New York: John Wiley & Sons; 2000.
12. Zanker K.J. Some hydraulic modelling techniques. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Conference Proceedings*. 1967;182(13):54–63. [https://doi.org/10.1243/PIME\\_CONF\\_1967\\_182\\_391\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_CONF_1967_182_391_02)
13. Bouchelaghem F. Multi-scale modelling of the permeability evolution of fine sands during cement suspension grouting with filtration. *Computers and Geotechnics*. 2009;36(6):1058–1071. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.03.016>
14. Denholm P., Ela E., Kirby B., Milligan M. The role of energy storage with renewable electricity generation. Technical Report NREL/TP-6A2-47187. Colorado: National Renewable Energy Laboratory; 2010.
15. Bowles J.E. *Foundation analysis and design*. 5th ed. Singapore: McGraw-Hill; 1997.
16. Kurian N.P. *Design of foundation systems, principles and practice*. 3rd ed. Delhi: Narosa Publishing House; 2007.