

Оригинальная статья

УДК 502/504:627.8:626.01:693.5

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-63-74

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ СТЕН ЗДАНИЯ СТАЦИОННОГО УЗЛА ГАЭС И СТЕН БАТОПОРТА СУХОГО ДОКА С РАЗРАБОТКОЙ МЕРОПРИЯТИЙ ПО УСИЛЕНИЮ

РУБИН ОЛЕГ ДМИТРИЕВИЧ¹, д-р техн. наук, доцент
rubinod@niies.ru

БЕЛЛЕНДИР ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ², д-р техн. наук,
генеральный директор АО «Институт Гидропроект»
e.bellendir@hydroproject.ru

ФРОЛОВ КИРИЛЛ ЕВГЕНЬЕВИЧ³, Ассоциация «ЭНЕРГОПРОЕКТ»
kefrolov@gmail.com

БАКЛЫКОВ ИГОРЬ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ¹✉, ведущий специалист
i.baklykov@hydroproject.ru

ИЛЬИН ЮРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ¹, канд. техн. наук,
заместитель директора филиала АО «Институт Гидропроект»
yu.ilin@hydroproject.ru

ЛИСИЧКИН СЕРГЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ¹✉, д-р техн. наук, главный научный сотрудник
cskte@mail.ru

¹ Филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» им. С.Я. Жука – НИИ энергетических сооружений», (АО «Институт Гидропроект»), 125080, Москва, Волоколамское ш., 2, Россия

² АО «Институт Гидропроект», 125080, Москва, Волоколамское ш., 2, Россия

³ Ассоциация «ЭНЕРГОПРОЕКТ»; 108811, г. Москва, Киевское шоссе 22-й км (п. Московский), домовладение 4, строение 2, блок Г, офис 900Г, БП «Румянцево», Россия

В статье приводятся результаты натурных и расчетных исследований железобетонных конструкций щитовой стены здания ГАЭС и батопорта сухого дока, которые являются ответственными конструкциями и от состояния которых зависят строительство и эксплуатация ГАЭС и сухого дока. На основе данных проведенных обследований был установлен характер трещинообразования в щитовой стене здания ГАЭС и в лицевой стене батопорта (обращенной в сторону сухого дока). Определены действующие нагрузки и причины образования трещин. Разработаны и практически реализованы мероприятия по усилению щитовой стены здания ГАЭС углеродными тканями, предложены мероприятия по усилению стен батопорта.

Ключевые слова: щитовая стена, здание ГАЭС, непроектная осадка, батопорт сухого дока, характер трещинообразования, метод разгрузки арматуры, усиление углеродными тканями

Формат цитирования: Рубин О.Д., Беллендир Е.Н., Баклыков И.В., Ильин Ю.А., Фролов К.Е., Лисичкин С.Е. Анализ характера трещинообразования стен здания стационарного узла ГАЭС и стен батопорта сухого дока с разработкой мероприятий по усилению // Природообустройство. – 2022. – № 4. – С. 63-74. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-63-74.

© Рубин О.Д., Беллендир Е. Н, Баклыков И.В., Ильин Ю.А., Фролов К.Е., Лисичкин С.Е., 2022

Original article

ANALYSIS OF THE NATURE OF CRACKING OF THE WALLS OF THE BUILDING OF THE HSPP STATION UNIT AND THE WALLS OF THE FLOATING BULKHEAD OF THE DRY DOCK WITH THE DEVELOPMENT OF MEASURES ON STRENGTHENING

RUBIN OLEG DMITRIEVICH¹, doctor of technical sciences, associate professor
rubinod@niies.ru

BELLENDIR EVGENY NIKOLAEVICH², doctor of technical sciences,
general director of JSC «Institute Hydroproject»
e.bellendir@hydroproject.ru

FROLOV KIRILL EVGENJEVICH³, Association «Energoproject»

kefrolov@gmail.com

BAKLYKOV IGOR VYACHESLAVOVICH¹✉, leading specialist

i.baklykov@hydroproject.ru

ILJIN YURY ALEXEEVICH¹, candidate of technical sciences,
deputy director of the branch JSC «Institute Hydroproject»

yu.ilin@hydroproject.ru

LISICHKIN SERGEY EVGENJEVICH¹✉, doctor of technical sciences, chief researcher

cskte@mail.ru

¹ Branch of JSC «Design, Survey and Research Institute «Hydroproject» named after S.Ya. Zhuk – Research Institute of Energy Structures», (JSC «Institute Hydroproject»), 125080, Moscow, Volokolamskoe sh., 2. Russia

² JSC «Institute Hydroproject», 125080, Moscow, Volokolamskoe shosse, 2. Russia

³ Association «ENERGOPROJECT»; 108811, Moscow, Kievskoe shosse 22nd km (Moskovsky village), house 4, building 2, block G, office 900G. Russia

The article presents the results of full-scale and computational studies of reinforced concrete structures of the shield wall of the PSPP building and the floating bulkhead of the dry dock, which are important structures, on the condition of which the construction and operation of the pumped-storage power plant and the dry dock depend. Based on the survey data, the nature of crack formation in the shield wall of the PSPP building and in the front wall of the floating bulkhead (facing towards the dry dock) was established. The acting loads and causes of crack formation were determined. The actual stresses in the armature were determined by the «valve unloading» method. Fines were cut down in concrete, the studied rod armature was bared, on which deformometers were installed and zero readings were taken. Calculation studies of the VAT of reinforced concrete structures of the shield wall of the PSPP building and the dry dock floating dam were carried out on the basis of spatial finite element models, including the structure and the base. The measures to reinforce the shield wall of the PSPP building with carbon fabrics were developed and practically implemented; the measures to strengthen the walls of the floating bulkhead were proposed.

Keywords: shield wall, pumped storage power plant building (PSPP building), non-design settlement, floating bulkhead of dry dock, nature of cracking, «armature unloading» method, carbon fabrics reinforcement

Format of citation: Rubin O.D., Bellendir E.N., Baklykov I.V., Iljin Yu.A., Frolov K.E., Lisichkin S.E. Analysis of the nature of cracking of the walls of the building of the HSPP station unit and the walls of the floating bulkhead of the dry dock with the development of measures on strengthening // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – № 4. – S. 63-74. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-63-74.

Введение. Железобетонные конструкции щитовой стены здания ГАЭС и батопорта сухого дока являются одними из ответственных несущих конструкций. От их состояния зависят как строительство, так и эксплуатация ГАЭС и сухого дока.

В результате обследований щитовой стены здания ГАЭС и лицевой стены (обращенной в сторону сухого дока) батопорта было выявлено трещинообразование в железобетоне конструкций. Потребовалось проведение анализа характера трещинообразования, определения нагрузок на щитовую стену и причин образования трещин в стене батопорта.

Были предложены мероприятия по усилению железобетонной конструкции щитовой стены здания ГАЭС углеродными тканями с их последующей практической реализацией. С учетом положительного опыта усиления железобетонных конструкций с использованием углеродных тканей представляется целесообразным усиление стен батопорта углеродными тканями.

Материалы и методы исследований.

Выполнены натурные исследования железобетонных конструкций щитовой стены здания ГАЭС и батопорта сухого дока. Проводилось исследование характера трещинообразования в железобетонных конструкциях с измерением ширины раскрытия трещин с применением микроскопа отчетного МПБ-3, а также их протяженности.

Фактические напряжения в арматуре определялись методом разгрузки арматуры [1]. При этом в бетоне вырубались штрабы, оголялась исследуемая стержневая арматура, на которую устанавливались деформометры, и снимались нулевые показания. Далее производилась разрезка арматурных стержней и снимались показания приборов после разгрузки арматурных стержней. Таким образом, определялась деформация, а также напряжения в арматуре.

Расчетные исследования НДС железобетонных конструкций щитовой стены здания ГАЭС и батопорта сухого дока выполнялись

на основе пространственных конечно-элементных моделей, включающих в себя сооружение и основание. В разработанных конечно-элементных моделях воспроизводились выявленные в ходе обследований трещины и межблочные строительные швы, фактическое армирование конструкций.

Результаты и их обсуждение. *Состояние щитовой стены здания ГАЭС.* Щитовая стена является наиболее ответственной конструкцией здания ГАЭС со стороны нижнего бьефа [2, 3], при эксплуатации выдерживает напор

порядка 30 м. Толщина щитовой стены 2 м выше отметки 149,85 м и 2,5 м – ниже отметки 149,85 м. Вид щитовой стены в составе здания ГАЭС представлен на рисунке 1 (размеры даны в м).

В процессе непроектной осадки здания ГАЭС правая сторона здания получила осадку 120 см, середина здания – осадку 40 см, левая сторона здания поднялась вверх на 20 см, при этом образовались трещины различного направления [4, 5]. Ниже приведены результаты исследования характера трещинообразования в щитовой стене здания ГАЭС.

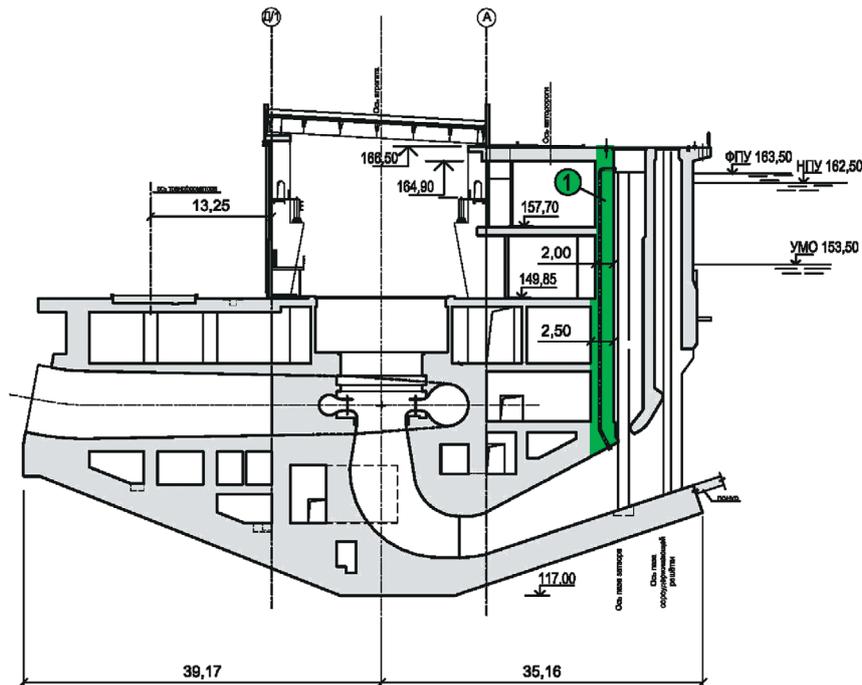


Рис. 1. Конструкция здания ГАЭС в сечении вдоль потока:

1 – щитовая стена

Fig. 1. Construction of the PSPP building in cross-section along stream:

1 – shield wall

Описание характера трещинообразования в щитовой стене в отметках 157,7...164,9 м. При проведении обследований щитовой стены здания ГАЭС в диапазоне отм. 136,3...164,9 м (изнутри машзала) был выявлен характер трещинообразования.

Наиболее характерные трещины отмечались в диапазоне отм. 157,7...164,9 м в осях 4-8 (рис. 2).

1. На участке между осями 6 и 8 расположен ряд трещин (16 шт.), имеющих наклон вправо ($80^\circ \dots 85^\circ$) (в осях 7-8) и ($75^\circ \dots 80^\circ$) (в осях 6-7), с преобладающей шириной раскрытия 0,2...0,3 мм (13 шт.); а также с шириной раскрытия 0,15 мм (3 шт.).

2. На участке между осями 5 и 6 расположен ряд трещин (14 шт.), имеющих наклон вправо ($70^\circ \dots 60^\circ$), с преобладающей шириной

раскрытия 0,15...0,3 мм (13 шт.); а также с шириной раскрытия 0,1 мм (1 шт.).

3. На участке между осями 4 и 5 расположен ряд трещин (12 шт.), имеющих наклон вправо ($65^\circ \dots 45^\circ$), с преобладающей шириной раскрытия 0...0,25 мм (10 шт.); а также с шириной раскрытия 0,1 мм (1 шт.) и 0,15 мм (1 шт.).

Действующие нагрузки в щитовой стене, вызывающие образование трещин. На основе анализа представленного выше характера расположения трещин были сделаны выводы о действующих нагрузках при непроектной осадке:

а) ось 8 является некоторой условной границей поворота вертикальных сечений здания ГАЭС (а также наклона трещин) влево и вправо (в осях 4-8 – вправо при общем наклоне здания вправо);

б) на участке в осях 8-7 наклон трещин вправо ($80^\circ \dots 85^\circ$), близкий к вертикальному положению, свидетельствует о действии изгибающего момента (зона «чистого изгиба»);

в) на участке в осях 7-6 наклон трещин вправо ($75^\circ \dots 80^\circ$) свидетельствует о преобладающем действии изгибающего момента совместно с поперечной силой;

г) на участке в осях 6-4 наклон трещин вправо (с плавным изменением угла наклона от 70° до 45°) свидетельствует о преобладающем действии поперечной силы совместно с изгибающим моментом. При этом, судя по изменению наклона трещин, возрастает влияние поперечной силы при уменьшении величины изгибающего момента.

Таким образом, отмечается сложный характер работы железобетонной конструкции здания ГАЭС (включая щитовую стену) при непроектной осадке. При этом в пределах конструкции щитовой стены в осях 4-8 можно выделить три характерных участка:

1) от оси 8 до оси 7 – зона действия изгибающего момента (зона практически «чистого изгиба») с максимумом по оси 8;

2) от оси 7 до оси 6 – зона преобладающего действия изгибающего момента совместно с поперечной силой;

3) от оси 6 до оси 4 – зона преобладающего действия поперечной силы совместно с изгибающим моментом.

Для определения фактического напряженного состояния в арматуре щитовой стены были проведены исследования методом разгрузки арматуры в 2014, 2015 и 2020 гг., результаты которых представлены в таблице 1.

Расчет напряженно-деформированного состояния здания ГАЭС осуществлялся методом конечных элементов на основе пространственной конечно-элементной модели здания ГАЭС. При этом был учтен опыт численного моделирования ГТС [6-10]. Для этой цели была разработана пространственная конечно-элементная модель, в рамках которой воспроизводились особенности пространственной конструкции здания ГАЭС; особенности инженерно-геологического строения основания сооружения; изменение свойств основания в период непроектной осадки; свойства материалов заполнения пустот в основании (на стадии стабилизации положения здания ГАЭС). Вид пространственной КЭ модели со стороны ВВ представлен на рисунке 3.

В рамках пространственной конечно-элементной модели воспроизводилось трещинообразование в щитовой стене здания ГАЭС, выявленное при обследованиях; фактическое стержневое армирование; нарушение сцепления арматуры с бетоном в зонах трещин [11, 12] и пр.

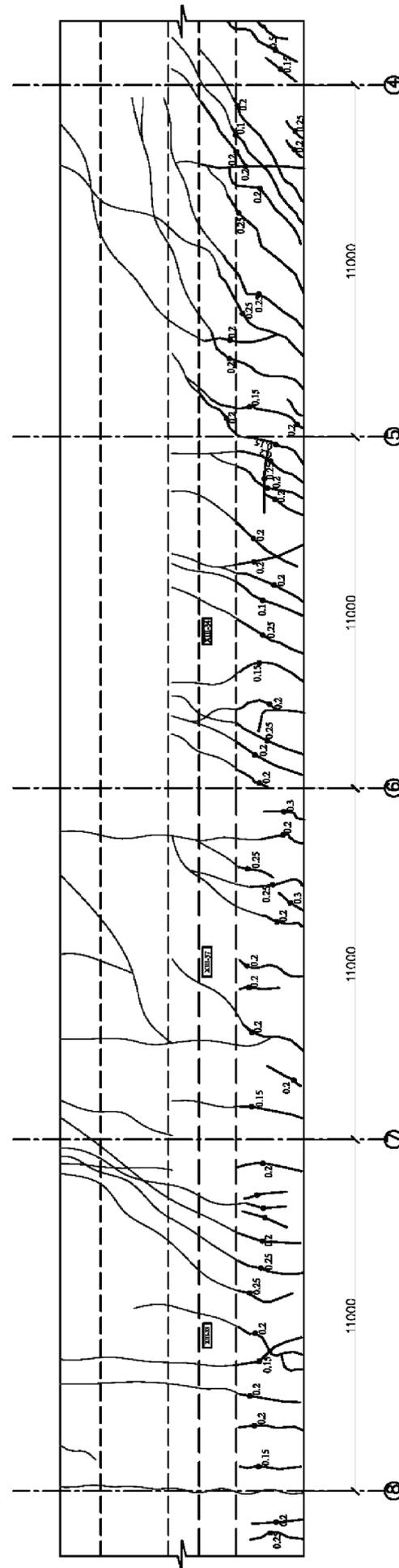


Рис. 2. Схема расположения трещин на щитовой стене в пределах отметок 157.70-164.90 м (оси 4-8)

Fig. 2 . Diagram of the location of cracks on the shield wall within the marks 157.70 - 164.90 m. (Axes 4-8)

Таблица 1

Значения напряжений в горизонтальной арматуре щитовой стены здания ГАЭС, определенных методом разгрузки арматуры, а также по показаниям приборов ПСАС, установленных в щитовой стене

Table 1

Stress values in the horizontal reinforcement of the shield wall of the PSPP building, determined by the method of «the armature unloading», as well as according to the readings of PSAC devices installed in the shield wall

Год проведения разгрузки <i>The year of unloading</i>	Отм., м <i>Mark, m</i>	Расположение места разгрузки <i>Location of the unloading point</i>	Напряжения при разгрузке, МПа <i>Stresses at unloading, MPa</i>	Напряжения (без учета разгрузки) на 15.01.21, МПа <i>Stresses (without taking into account unloading) on 15.01.21, MPa</i>	Напряжения (без учета разгрузки) на 11.04.22, МПа <i>Stresses (without taking into account unloading) on 11.04.22, MPa</i>
2015	150,35	Оси 7-8 / <i>Axes 7-8</i>	+(157,3)	+35.0	+36.1
2020	150,35	Машзал. Ось 7 <i>Turbine room. Axis 7</i>	+87,0	-3.2	-1.3
2014	150,35	Компрессорная № 2. Оси 5-6 <i>Compressor house. Axes 5-6</i>	+91,0	-41.8	-21.1
2020	150,35	Ось 5 / <i>Axis 5</i>	+80,1	-2.3	+9.3
2015	159,20	Венткамера № 1. Оси 8-9 <i>Ventilation chamber № 1. Axes 8-9</i>	+97,1	+13.0	+30.3
2020	159,20	Ось 5 / <i>Axis 5</i>	+105,4	-3.5	+25.3
2014	159,20	Венткамера № 1. Оси 2-3 <i>Ventilation chamber № 1. Axes 2-3</i>	+15,9	-25.3	-43.0

Определение фактического напряженно-деформированного состояния щитовой стены здания ГАЭС после непроектной осадки. Расчетные исследования НДС конструкций щитовой стены здания ГАЭС проводились методом конечных элементов на основе пространственной конечно-элементной модели здания ГАЭС совместно с основанием (рис. 3).

При проведении расчетов учитывались результаты выполненных обследований здания ГАЭС.

Результаты проведенных расчетов фактического состояния щитовой стены здания ГАЭС показали согласование с данными инструментального исследования на основе применения метода разгрузки арматуры.

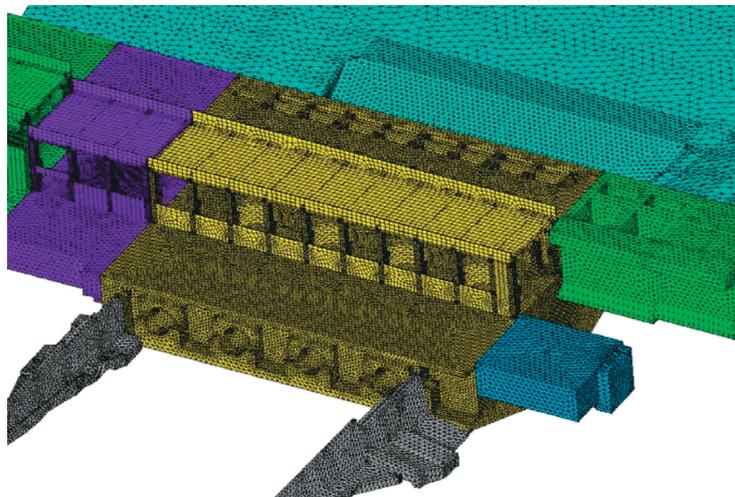


Рис. 3. Пространственная конечно-элементная модель здания ГАЭС в составе сооружений станционного узла (вид со стороны ВВ)

Fig. 3. Spatial finite element model of the PSPP building as part of the station unit structures: (view from the side of the VB)

В качестве примера в таблице 2 представлено сопоставление результатов расчетных исследований напряженно-деформированного

состояния щитовой стены здания ГАЭС с данными инструментального исследования на основе применения метод «разгрузки арматуры».

Таблица 2

Сопоставление расчетных и натурных результатов определения фактических напряжений (МПа) в арматуре щитовой стены здания ГАЭС

Table 2

Comparison of calculated and field results of determining the actual stresses (MPa) in the reinforcement of the shield wall of the PSPP building

Отметка, м <i>Mark, m</i>	Конструкция <i>Construction</i>	Расчетные значения <i>Calculated values</i>	Натурные значения (методом «разгрузки арматуры») <i>Field results (by the method «armature unloading»)</i>
151,35	щитовая стена в/о 7-8 (пом. № 007.1) <i>shield wall in / a 7-8 (room No007.1)</i>	164,0	157,3
144,20	щитовая стена в/о 6-7 (пом. № 049) <i>shield wall in / a o 6-7 (room № 049)</i>	93,0	74,1

Результаты расчетов показали, что в арматуре щитовой стены здания ГАЭС действуют максимальные растягивающие напряжения, достигающие 164,0 МПа. Полученные значения напряжений в арматуре не превышают предельно допустимых по нормам значений расчетного сопротивления арматуры (435 МПа).

На основе анализа результатов обследования щитовой стены (включая определение напряжений в арматуре методом разгрузки арматуры) и расчетных исследований были разработаны проектные решения по усилению щитовой стены (рис. 4). Так, на участках щитовой стены

в отм. 157,7 м...164,9 м (в осях 5-8) было предложено установить два слоя углеродной ленты шириной 300 мм с просветами 200 мм (3,53 см² на 1 пог. м) в горизонтальном направлении и один слой углеродной ленты шириной 300 мм с просветами 200 мм – в вертикальном направлении (1,76 см² на 1 пог. м). В осях 4-5 было предложено установить два слоя углеродной ленты шириной 300 мм с просветами 200 мм под углом 45° (пересекающие выявленные наклонные трещины); а также один слой углеродной ленты в перпендикулярном направлении шириной 300 мм с просветами 200 мм.

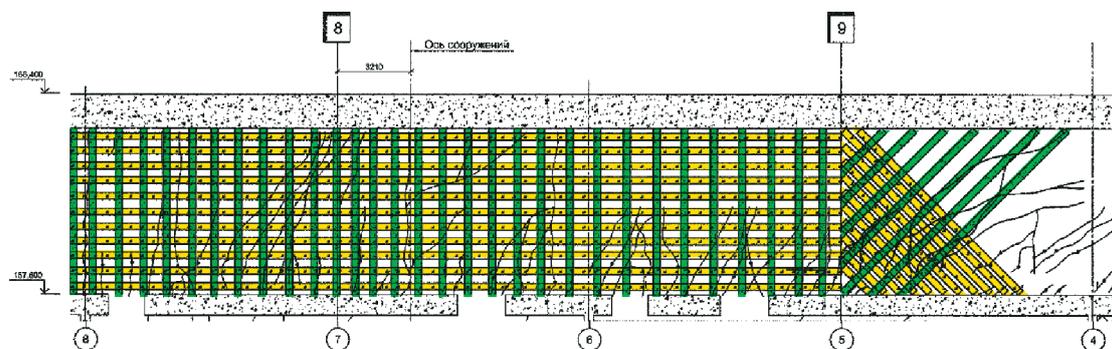


Рис. 4. Схема усиления щитовой стены в отм. 157,60...164,90 м (оси 4-8)

Fig.4. Scheme of reinforcement of the shield wall in mark 157,60... 164.90 m (4-8 axes)

При этом предусматривалось использование лент из углеродного волокна типа FibARM 530/300 толщиной 0,294 мм, шириной 300 мм (с расчетным сопротивлением растяжению 2160 МПа и модулем деформации 245000 МПа).

Представленные выше результаты были реализованы в проекте усиления железобетонных конструкций здания ГАЭС.

Состояние батопорта сухого дока. В настоящее время проводится строительство сухого

дока для возведения оснований гравитационного типа (ОГТ), необходимых для производства, хранения и отгрузки сжиженного природного газа (СПГ) и стабильного газового конденсата (СГК). Строительство ОГТ выполняется в Центре строительства крупнотоннажных морских сооружений (ЦСКМС), предназначенном для изготовления оснований гравитационного типа и интеграции модулей верхних строений. Уровень ответственности данных гидротехнических сооружений повышенный.

Сухой док на время возведения конструкций ОГТ перекрывается гидротехническим затвором (батопортом) и осушается.

Батопорт сухого дока представляет собой прямоугольную конструкцию, выполненную из железобетона, с открытой верхней частью,

общей длиной 200 м, шириной 20 м и высотой 21 м. Он разделен внутренними поперечными (поперек длины батопорта) стенами-перегородками на 11 резервуаров или отсеков, каждый из которых в свою очередь разделен переборками на две ячейки (рис. 5).

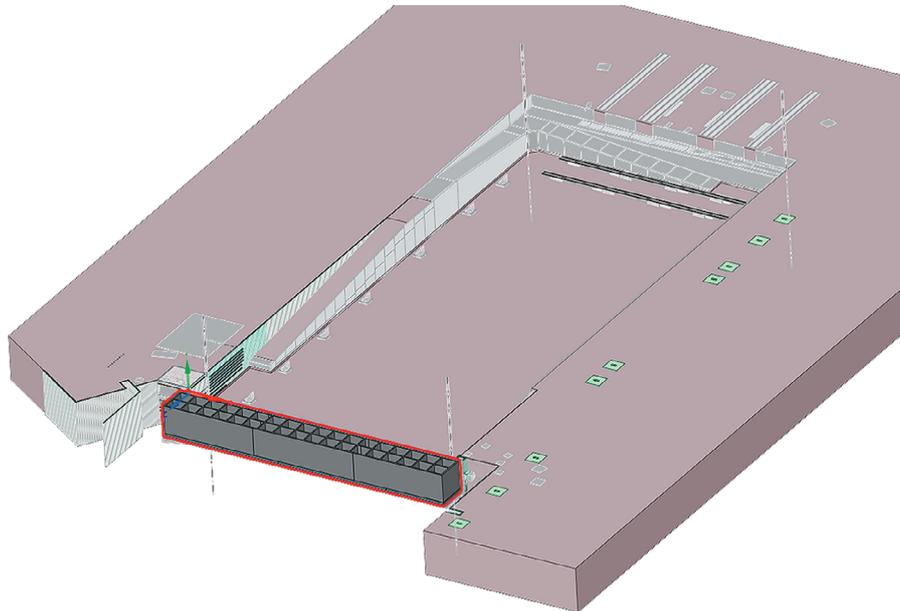


Рис. 5. Общий вид железобетонной конструкции батопорта в составе сухого дока

Fig. 5. General view of the reinforced concrete structure of the floating bulkhead as part of the dry dock

Поперечный разрез батопорта представлен на рисунке 6.

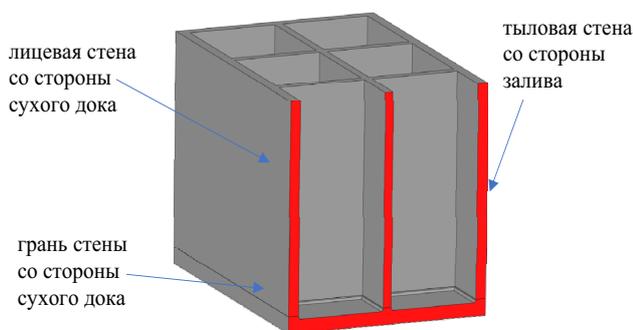


Рис. 6. Поперечный разрез батопорта

Fig. 6. Cross-section of the floating bulkhead

Толщина напорной стены батопорта, обращенной в сторону сухого дока (а также параллельной ей тыловой стены со стороны залива), составляет 1 м. Высота стены составляет 19,5 м (с отн. $-15,7$ м до отн. $+3,8$ м).

Технологически батопорт разбит по длине на блоки бетонирования, каждый блок бетонирования – длиной до 70 м. При этом в процессе бетонирования блоки возводятся поочередно с образованием вертикальных строительных швов. Первые два блока бетонирования (расположенные в осях 7-19) возводились при положительной

температуре воздуха, а последний блок бетонирования (в осях 1-7) возводился при отрицательной температуре до -20°C . В свою очередь (в силу технологических причин), последний блок бетонирования был разбит еще на две части (в осях 1-5 и 5-7), которые также возводились поочередно.

Описание характера трещинообразования в лицевой стене батопорта. После возведения и в начальном периоде эксплуатации было проведено обследование конструкций батопорта, в ходе которого выявлены трещины на лицевой грани стены батопорта.

Наиболее характерные трещины были обнаружены на участке стены в осях 3-6 (рис. 7, 8).

Как следует из рисунков 7, 8, в ходе обследования были выявлены вертикальные, горизонтальные и наклонные трещины.

Следует отметить, что наибольшая ширина раскрытия трещин составила 0,2 мм. Так, на участке между осями 3 и 4 расположен ряд трещин (9 шт.), в том числе вертикальные трещины, идущие снизу вверх (6 шт.), одна из которых разветвляется в верхней части и доходит до границы сжатой зоны в верхней части стены (обусловленной продольным предварительным напряжением, неодинаковым по высоте стены). Также до границы сжатой зоны стены доходят еще две вертикальные трещины.

Остальные вертикальные трещины (3 шт.) 3/4 высоты стены, около 1/2 высоты стены, имеют протяженность, соответственно, около 1/3 высоты стены.



Рис. 7. Вид трещинообразования в стене батопорта
Fig.7. Type of cracking in the wall of the floating bulkhead

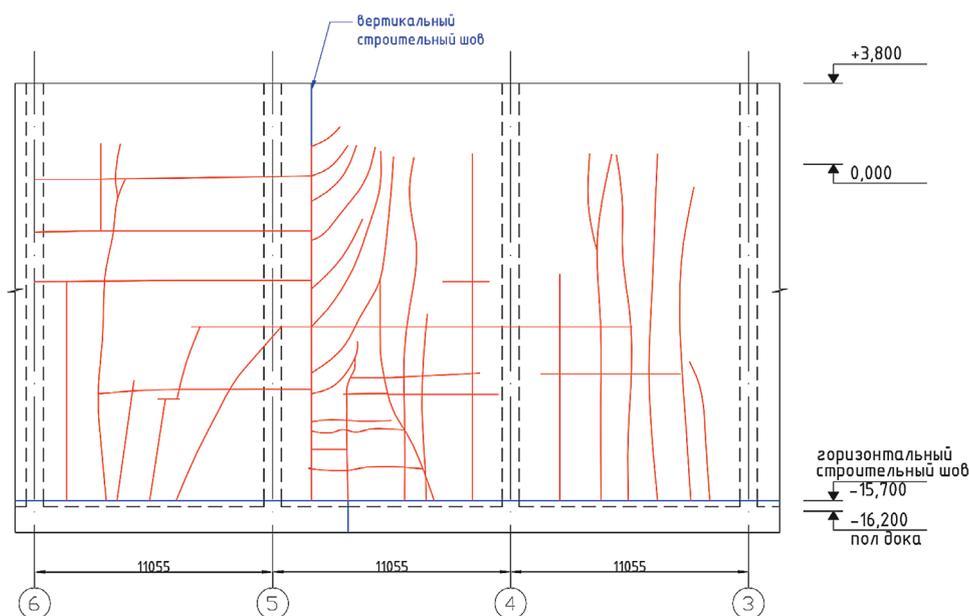


Рис. 8. Схема трещинообразования на лицевой грани стены батопорта в осях 3-6
Fig.8. Scheme of cracking on the front face of the floating bulkhead wall in axes 3-6

Также зафиксированы горизонтальные трещины в нижней трети стены (2 шт.). При этом расстояние по высоте между горизонтальными трещинами составляет порядка 3 м (соответствующим блокам бетонирования, организованным строителями).

На участке между осями 4 и 5 расположен ряд трещин (21 шт.), в том числе сеть наклонных трещин (8 шт.), выходящих из вертикального строительного шва (вблизи оси 5). Наклонные трещины выходят из вертикального строительного шва под углами порядка

30°...45°. При этом на отдалении от строительного шва направление трещин изменяется в сторону увеличения углов наклона, вплоть до вертикального. Наклонные трещины завершаются на границе сжатой зоны стены (в верхней части стены).

Также выявлены вертикальные трещины (5 шт.): три из них достигают границы сжатой зоны (в верхней части стены), одна достигает 1/2 высоты стены, еще одна – 1/3 высоты стены. Вместе с ними выявлены горизонтальные трещины (8 шт.) в нижней половине

стены (в основном соответствующие блокам бетонирования, организованным строителями), одна из которых полностью пересекает участок между осями 4-5.

На участке между осями 5 и 6 расположен ряд трещин (11 шт.), в том числе горизонтальные трещины (5 шт.), в основном соответствующие блокам бетонирования, организованным строителями. Три из них расположены в верхней половине стены и полностью пересекают участок в осях 5-6.

Особого внимания заслуживают наклонные трещины (3 шт.), возникшие на нижней грани стены по углам 55° , 70° , 70° , две из которых продолжаются далее по горизонтальному шву, организованному строителями (в том числе заходя на участок в осях 4-5). Далее горизонтальные трещины по шву бетонирования находят свое продолжение в виде наклонной трещины, выходящей из вертикального шва (вблизи оси 5) на участке в осях 4-5.

Также выявлены вертикальные трещины (3 шт.). Одна из них разветвляется в верхней части стены и доходит до границы сжатой зоны, другая – до горизонтальной трещины между блоками бетонирования в середине стены, третья трещина выходит из горизонтальной трещины в верхней трети стены и достигает сжатой зоны стены.

Причины образования трещин в лицевой стене батопорта. На основе анализа представленного выше характера расположения трещин в лицевой стене батопорта были сделаны выводы о возможных причинах их возникновения. При анализе был учтен опыт расчетов ГТС [15-20].

Блоки бетонирования в осях 1-7 возводились в условиях зимней температуры, доходящей до -20°C .

Наклонные трещины, как показали проведенные поверочные расчетные исследования, могли возникнуть уже на стадии строительства, в период возведения очередных блоков бетонирования [13, 14]. В то время как данный блок бетонирования был возведен полностью и его вертикальные перемещения (осадки) уже сформировались, начинается этап послойного возведения соседнего блока бетонирования. При этом вновь возводимый блок бетонирования под действием своего веса также приобретает вертикальные перемещения (осадки) и тем самым влияет на напряженно-деформированное состояние ранее возведенного блока, создавая касательные напряжения по контакту на их общей грани. Вследствие этого возникают главные растягивающие

напряжения под углом 45° , которые приводят к возникновению наклонных трещин, выходящих из строительного межблочного шва. При этом по мере удаления от вертикального шва между блоками траектории наклонных трещин искривляются и стремятся к вертикальному направлению.

Горизонтальные трещины возникли по всей видимости при бетонировании в зимних условиях (при температуре до -20°C). Характер расположения горизонтальных трещин свидетельствует о том, что стена батопорта возводилась при послойной укладке бетонной смеси. В условиях зимнего бетонирования горизонтальный контакт между соседними слоями был нарушен, что привело к образованию горизонтальных трещин вдоль контакта ранее уложенного бетона и нового бетона.

По каждой из осей батопорта предусмотрены перегородки поперек лицевой стены, что является усилением участков вблизи осей. В этой связи на данных участках (в зонах поперечных перегородок) выявлено меньшее количество трещин, чем на остальной протяженности стены. Вертикальные трещины в лицевой стене батопорта возникли преимущественно в средней части пролетов стены между поперечными перегородками (на удалении от перегородок).

Важным обстоятельством является то, что батопорт расположен на фундаментной плите. Под действием зимней температуры (до -20°C) конструкция стены батопорта стремится укоротиться, в том числе в горизонтальном направлении. Однако сила трения на контакте днища батопорта с фундаментной плитой оказывает сопротивление этому укорочению, вызывая горизонтальное растяжение с максимумом на контакте с фундаментной плитой. Горизонтальное растяжение вызывает образование вертикальных трещин в пролетах лицевой стены между поперечными перегородками батопорта.

Проектом предусматривается горизонтальное обжатие конструкции батопорта канатами (предварительное напряжение), расположенными в заранее предусмотренных каналах, проложенных вдоль батопорта по всей его высоте. При этом обжатие производится поэтапно: начинается в верхних канатах и заканчивается в канатах нижней части, расположенных в днище батопорта. По высоте батопорта количество канатов расположено неравномерно: в верхней трети сконцентрировано 9 канатов, в нижней части количество канатов существенно уменьшается (5 канатов). Таким образом, суммарное натяжение канатов

неравномерно по высоте конструкции батопорта, как показано на рисунке 9.

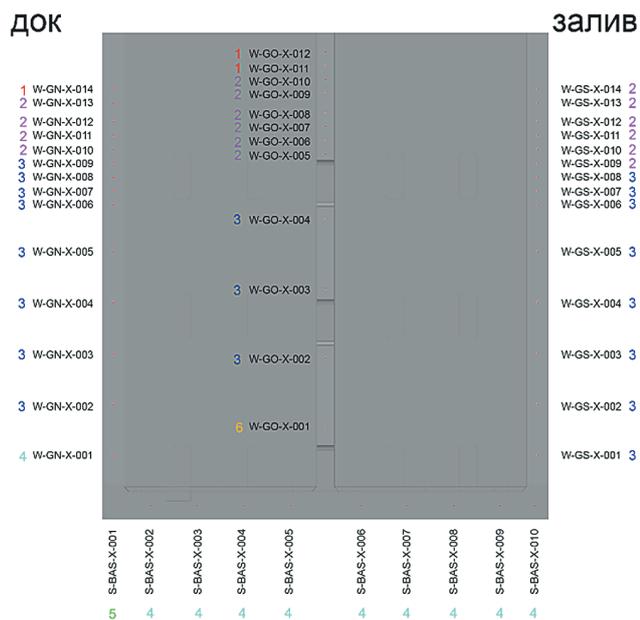


Рис. 9. Последовательность натяжения канатов
Fig. 9. Sequence of ropes tension

Таким образом, неравномерное напряженно-деформированное состояние от воздействия зимней (отрицательной) температуры усиливается неравномерностью натяжения канатов по высоте батопорта.

При эксплуатации батопорта в период производства работ по возведению ОГТ в сухом доке батопорт установлен на свое посадочное место и заполнен водой. Таким образом, лицевая стена батопорта испытывает гидростатическое давление, направление изнутри батопорта в сторону сухого дока. При этом раскрытие трещин (в первую очередь, вертикальных трещин), сформировавшихся в период строительства, будет увеличиваться.

Анализ характера трещинообразования в лицевой стене батопорта показал, что вертикальные, наклонные, горизонтальные трещины образовались при совместном действии комплекса сил: изгибающих моментов, поперечных сил, продольных сил, изменяющихся по величине на участке стены в осях 3-6.

Следует отметить, что были выполнены работы по инъектированию трещин в лицевой стене батопорта специальными составами.

Необходимо произвести усиление стен батопорта: как внутренней, лицевой стены (со стороны сухого дока), так и внешней, находящейся в контакте с акваторией. Целесообразно выполнять усиление с применением углеродных тканей. При этом положительным примером усиления углеродными тканями

является усиленная конструкция щитовой стены здания ГАЭС.

Преимуществами усиления углеродными тканями по сравнению с усилением традиционными методами на основе применения бетона, арматуры, металлоконструкций являются:

- значительно меньший вес по сравнению с бетоном и арматурой;
- более высокие прочностные и жесткостные характеристики;
- коррозионная стойкость;
- достаточно простые технологические процедуры при производстве работ по усилению;
- возможность использования при усилении элементов со сложными геометрическими конфигурациями;
- то, что усиление конструкции композитом практически не изменяет ее геометрические размеры.

При проведении обследований были зафиксированы следы протечек воды изнутри батопорта через выявленные трещины, в том числе следы выщелачивания бетона (выделения белого цвета). В этой связи следует производить усиление лицевой стены батопорта (со стороны сухого дока) не только с лицевой стороны, но и со стороны внутри батопорта. Наружную стену батопорта (со стороны акватории) также следует усиливать с внутренней стороны. В этих целях необходимо провести осушение батопорта изнутри.

Предложенные мероприятия позволяют не только повысить прочность и ограничить развитие трещин в стенах батопорта, но также повысить водонепроницаемость конструкции.

Выводы

1. Выявлен характер трещинообразования в щитовой стене здания ГАЭС и лицевой стене батопорта (со стороны сухого дока). На основе анализа характера трещинообразования установлены действующие нагрузки на конструкцию щитовой стены здания ГАЭС, причины образования трещин в стене батопорта.

2. Необходимо выполнить усиление внутренней (со стороны сухого дока) и наружной (со стороны акватории) стен батопорта. Учитывая положительный пример усиления щитовой стены углеродными тканями, целесообразно выполнить усиление стен батопорта углеродными тканями, имеющее значительные преимущества по сравнению с усилением традиционными способами. При этом наряду с усилением лицевой стены батопорта (со стороны сухого дока) с лицевой стороны необходимо произвести повсеместное усиление углеродными лентами обеих стен батопорта изнутри, что послужит повышению водонепроницаемости стен батопорта.

Библиографический список

1. Пат. 2704327 РФ, МПК G01L 1/00, C1. Способ определения изгибающей и крутящей составляющих напряжений в арматурных стержнях / Рубин О.Д., Фролов К.Е., Лисичкин С.Е., Антонов А.С.; патентообладатель Рубин О.Д. Заявл. 31.01.2019; опубл. 28.10.2019.
2. **Серебрянников Н.И.** Гидроаккумулирующие электростанции. Строительство и эксплуатация Загорской ГАЭС / Н.И. Серебрянников, В.Г. Родионов, А.П. Кулешов и др. – М.: Изд-во «НЦ ЭНАС», 2000. – 355 с.
3. **Синюгин В.Ю., Магрук В.И., Родионов В.Г.** Гидроаккумулирующие электростанции в современной электроэнергетике. – М.: НЦ ЭНАС, 2008. – 352 с.
4. **Александров А.В.** Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы / А.В. Александров, Е.Н. Беллендир, С.Я. Лашенцов и др. // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 7. – С. 2-10.
5. **Беллендир Е.Н., Лисичкин С.Е., Рубин О.Д.** Обоснование эксплуатационного состояния здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 // Гидротехническое строительство. – 2020. – № 10. – С. 5-13.
6. **Рубин О.Д., Камнев Н.М., Лисичкин С.Е.** Расчет прочности фрагмента турбинного блока со спиральной камерой здания ГЭС гидроузла Аль Вахда // Гидротехническое строительство. – 1995. – № 12. – С. 38-42.
7. **Рубин О.Д.** Расчетная оценка напряженно-деформированного состояния левого блока здания Плявинской ГЭС с учетом данных натуральных наблюдений / О.Д. Рубин, С.Е. Лисичкин, И.Э. Шакарс, С.П. Новиков // Гидротехническое строительство. – 1998. – № 2. – С. 47-53.
8. **Рубин О.Д.** Исследования бетонных и железобетонных энергетических сооружений / О.Д. Рубин, С.Е. Лисичкин, О.Б. Ляпин, А.В. Неведов // Гидротехническое строительство. – 1999. – № 8/9. – С. 22-28.
9. **Рубин О.Д.** Расчетное обоснование решений по обеспечению надежности конструкций водосброса № 2 бетонной плотины Богучанской ГЭС / О.Д. Рубин, С.Е. Лисичкин, В.П. Гребенщиков и др. // Известия ВНИИГ. – 2005. – Т. 244. – С. 227-233.
10. **Рубин О.Д.** Оценка напряженно-деформированного состояния и прочности железобетонных конструкций компенсационных секций напорных водоводов Загорской ГАЭС / О.Д. Рубин, Ю.А. Ильин, С.Е. Лисичкин и др. // Гидротехническое строительство. – 2001. – № 9. – С. 16-19.
11. **Changyong Li, Yabin Yang.** Experimental Research on Interfacial Bonding Strength between Vertical Cast-In-Situ Joint and Precast Concrete Walls. Crystals. – 2021. – 11. – 494. – URL: <https://doi.org/10.3390/cryst11050494>.
12. **Akishin, Pavel & Kovalovs, Andrejs & Kulakov, Vladimir & Arnautov A.** (2014). Finite element modelling of slipage between FRP rebar and concrete in pull-out test. 6. 10.7250/iscconstrs.2014.01.
13. **Torres A. & Ramos-Cañón A. & Prada Sarmiento, Luis & Botia, Manuel.** Mechanical behavior of concrete cold joints. RevistaIngenieria de Construcion. – 2016. – № 31. – Pp. 151-162.
14. **Jonathan Vanlalruata, ComingstarfulMarthong.** Effect of cold joint on the flexural strength of RC beam // Journal of Structural Integrity and Maintenance. – 2021. – № 6:1. – Pp. 28-36. DOI: 10.1080/24705314.2020.1823556.
15. **Pantouvakis John-Paris & Panas Antonis.** Computer simulation and analysis framework

References

1. Pat. 2704327 RF, MPK G01L 1/00, C1. Sposob opredeleniya izgibnoy i krutyashchey sostovlyayushchih napryazhenij v armaturnyh sterzhnyah / Rubin O.D., Frolov K.E., Lisichkin S.E., Antov A.S.; patentooblada-tel Rubin O.D. – zayavl. 31.01.2019; opubl. 28.10.2019.
2. **Serebryannikov N.I.** Hidroakkumuliruyushchie elektrostantsii. Stroitelstvo i expluatatsiya Zagorskoj GAES / N.I. Serebryannikov, V.G. Rodionov, A.P. Kuleshov [i dr.]. – M.: Izd. «NTS ENAS», 2000. – 355 s.
3. **Sinyugin V.Yu., Magruk V.I., Rodionov V.G.** Hidroakkumuliruyushchie elektrostantsii v soremennomy elektroenergetike. – M.: NTS ENAS, 2008. – 352 s.
4. **Alexandrov A.V.** Likvidatsiya posledstvij osadki zdaniya stantsionnogo uzla Zagorskoj GAES-2 i vosstanovitelnye raboty / A.V. Alexandrov, E.N. Bellendir, S.Ya. Lashchenov i dr. // Gidrotehnicheskoe stroitelstvo. – 2016. – № 7. – S. 2-10.
5. **Bellendir E.N., Lisichkin S.E., Rubin O.D.** Obosnovanie expluatatsionnogo sostoyaniya zdaniya stantsionnogo uzla Zagorskoj GAES-2 // Gidrotehnicheskoe stroitelstvo. – 2020. – № 10. – S. 5-13.
6. **Rubin O.D., Kamnev N.M., Lisichkin S.E.** Raschet prochnosti fragmenta turbinnogo bloka so spiralnoj kameroy zdaniya GES gidrouzla Al Vahda // Gidrotehnicheskoe stroitelstvo. – 1995. – № 12. – S. 38-42.
7. **Rubin O.D.** Raschetnaya otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya levogo bloka zdaniya Plyavinsoj GES s uchetom dannyh naturnyh nablyudeni-j / O.D. Rubin, S.E. Lisichkin, I.E. Shakars, S.P. Novikov // Gidrotehnicheskoe stroitelstvo. – 1998. – № 2. – S. 47-53.
8. **Rubin O.D.** Issledovaniya betonnyh i zhelezobetonnyh energeticheskikh sooruzhenij / O.D. Rubin, C.E. Lisichkin, O.B. Lyapin, A.V. Nefedov // Gidrotehnicheskoe stroitelstvo. – 1999. – № 8/9. – S. 22-28.
9. **Rubin O.D.** Raschetnoe obosnovanie reshenij po obespecheniyu nadezhnosti konstruksij vodobrosa № 2 betonnoj plotiny Boguchanskoj GES / O.D. Rubin, S.E. Lisichkin, V.P. Grebenshchikov i dr. // Izvestiya VNIIG. – 2005. – t. 244. – S. 227-233.
10. **Rubin O.D.** Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i prochnosti zhelezobetonnyh konstruksij kompensatsionnyh seksij napornyh vodovodov Zagorskoj GAES / O.D. Rubin Yu.A. Iljin, S.E. Lisichkin i dr. // Gidrotehnicheskoe stroitelstvo. – 2001. – № 9. – S. 16-19.
11. **Changyong Li, Yabin Yang.** Experimental Research on Interfacial Bonding Strength between Vertical Cast-In-Situ Joint and Precast Concrete Walls. Crystals. 2021, 11, 494. <https://doi.org/10.3390/cryst11050494>
12. **Akishin, Pavel & Kovalovs, Andrejs & Kulakov, Vladimir & Arnautov A.** (2014). Finite element modelling of slipage between FRP rebar and concrete in pull-out test. 6. 10.7250/iscconstrs.2014.01.
13. **Torres A. & Ramos-Cañón A. & Prada Sarmiento, Luis & Botia, Manuel.** (2016). Mechanical behavior of concrete cold joints. RevistaIngenieria de Construcion. 31. 151-162.
14. **Jonathan Vanlalruata, Comingstarful Marthong.** Effect of cold joint on the flexural strength of RC beam. Journal of Structural Integrity and Maintenance. 2021. 6:1, 28-36, DOI: 10.1080/24705314.2020.1823556
15. **Pantouvakis, John-Paris & Panas, Antonis.** (2013). Computer simulation and analysis framework

for floating caisson construction operations // Automation in Construction. – 2013 – № 36. – Pp. 196-207. 10.1016/j.autcon.2013.04.003.

16. Meneses Lucia & Sarmiento Javier & Dolores Daniel & Blanco David & Guanche Raul Losada Íñig & Segovia María & Ruiz Manuel & Martín, Miguel & Conde María José & Esteban Francisco (2018). Large Scale Physical Modelling for a Floating Concrete Caisson in Marine Works. V07AT06A025. 10.1115/OMAE2018-77585.

17. Lee Il-Geun & Kim Dong-Hyawn (2022). Load Resistance Factor for Vertical Caisson Breakwater in Korea // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – № 10. – P. 468. 10.3390/jmse10040468.

18. Zhu Bin & Li Zhenyi & Chen Xingchao & Kong Deqiong & Qian Hao & Yang Ming & Pan Ji & Zhang Zhicheng. Experimental study on vertical and lateral behaviour of open caisson foundations in clay. Marine Georesources & Geotechnology. – 2022. – 1-11. 10.1080/1064119X.2022.2070807.

19. Pérez-Díaz Pedro & Martin-Dorta Norena & Gutiérrez-García Francisco. Construction Labour Measurement in Reinforced Concrete Floating Caissons in Maritime Ports // Civil Engineering Journal. – 2022. – № 8. – Pp. 195-208. 10.28991/CEJ-2022-08-02-01.

20. Wang An-Hui & Zhang Yan-Fang & Xia Fan & Luo Ru-Ping & Wang Ning Study of the Lateral Bearing Capacity and Optimization Reinforcement Scheme of an Open Caisson with Consideration of Soil Disturbance // Applied Sciences. – 2022. – № 12. – P. 5498. 10.3390/app12115498.

Критерии авторства

Рубин О.Д., Беллендир Е.Н., Баклыков И.В., Ильин Ю.А., Фролов К.Е., Лисичкин С.Е. 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

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Статья поступила в редакцию 30.05.2022 г.

Одобрена после рецензирования 12.09.2022

Принята к публикации 19.09.2022

for floating caisson construction operations. Automation in Construction. 36. 196-207. 10.1016/j.autcon.2013.04.003.

16. Meneses, Lucia & Sarmiento, Javier & Dolores, Daniel & Blanco, David & Guanche, Raul & Losada, Íñigo & Segovia, María & Ruiz, Manuel & Martín, Miguel & Conde, María José & Esteban, Francisco. (2018). Large Scale Physical Modelling for a Floating Concrete Caisson in Marine Works. V07AT06A025. 10.1115/OMAE2018-77585.

17. Lee, Il-Geun & Kim, Dong-Hyawn. (2022). Load Resistance Factor for Vertical Caisson Breakwater in Korea. Journal of Marine Science and Engineering. 10. 468. 10.3390/jmse10040468.

18. Zhu, Bin & Li, Zhenyi & Chen, Xingchao & Kong, Deqiong & Qian, Hao & Yang, Ming & Pan, Ji & Zhang, Zhicheng. (2022). Experimental study on vertical and lateral behaviour of open caisson foundations in clay. Marine Georesources & Geotechnology. 1-11. 10.1080/1064119X.2022.2070807.

19. Pérez-Díaz, Pedro & Martin-Dorta, Norena & Gutiérrez-García, Francisco. (2022). Construction Labour Measurement in Reinforced Concrete Floating Caissons in Maritime Ports. Civil Engineering Journal. 8. 195-208. 10.28991/CEJ-2022-08-02-01.

20. Wang, An-Hui & Zhang, Yan-Fang & Xia, Fan & Luo, Ru-Ping & Wang, Ning. (2022). Study of the Lateral Bearing Capacity and Optimization Reinforcement Scheme of an Open Caisson with Consideration of Soil Disturbance. Applied Sciences. 12. 5498. 10.3390/app12115498.

Criteria of authorship

Rubin O.D., Bellendir E.N., Baklykov I.V., Iljin Yu.A., Frolov K.E., Lisichkin S.E. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Rubin O.D., Bellendir E.N., Baklykov I.V., Iljin Yu.A., Frolov K.E., Lisichkin S.E. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 30.05.2022

Approved after reviewing 12.09.2022

Accepted for publication 19.09.2022