

DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-4-324-334

УДК 620.16/17

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций подпорных стен ЛН-1 и ЛН-2 Загорской ГАЭС с учетом раскрытия межблочных швов и образования вторичных трещин

Н.В. Ханов¹ , Ф.А. Пащенко² ¹Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация²АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта „ЛенАэроПроект“», Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ lenair@lenair.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 13 апреля 2021 г.

Доработана: 21 июля 2021 г.

Принята к публикации: 28 июля 2021 г.

Для цитирования

Ханов Н.В., Пащенко Ф.А. Напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций подпорных стен ЛН-1 и ЛН-2 Загорской ГАЭС с учетом раскрытия межблочных швов и образования вторичных трещин // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 4. С. 324–334. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-4-324-334>

Аннотация. *Актуальность.* Низовые подпорные стены водоприемника Загорской ГАЭС выполняют ответственную функцию защиты напорных водоводов от обрушения грунтового массива. Две из них (ЛН-2 и ЛН-3) были усилены анкерными тягами. Учитывая длительный период эксплуатации (более 25 лет) при обследованиях и натуральных наблюдениях выявлены определенные отклонения в работе. Так, на лицевой грани стен зафиксированы протяженные горизонтальные трещины (раскрытие горизонтальных межблочных швов и выход вторичных наклонных трещин на лицевую поверхность стен). Потребовалось проведение расчетных исследований напряженно-деформированного состояния низовых подпорных стен. *Цель исследования* заключалась в определении напряженно-деформированного состояния низовых подпорных стен водоприемника Загорской ГАЭС с учетом раскрытия межблочных швов и образования вторичных наклонных трещин. *Методы.* Расчет напряженно-деформированного состояния подпорных стен проводился в рамках методики численного моделирования железобетонных конструкций гидротехнических сооружений на основе конечно-элементных моделей. В конечно-элементных моделях воспроизводились конструктивные особенности подпорных стен, в том числе анкерные тяги, горизонтальные межблочные швы, фактическое армирование, вторичные наклонные трещины. *Результаты.* Получено напряженно-деформированное состояние подпорных стен. Определены напряжения в продольной и поперечной арматуре, в том числе при изменении схемы работы конструкции из-за анкерных тяг. В горизонтально поперечной арматуре зафиксированы растягивающие напряжения, превышающие предел текучести. Потребовалась разработка мероприятий по усилению низовых подпорных стен.

Ключевые слова: водоприемник, Загорская ГАЭС, низовые подпорные стены, анкерные тяги, межблочные швы, наклонные вторичные трещины, напряженно-деформированное состояние, конечно-элементные модели

Ханов Нартмир Владимирович, доктор технических наук, заведующий кафедрой гидротехнических сооружений, Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Российская Федерация, 127550, Москва, ул. Прянишникова, д. 19; ORCID: 0000-0002-5764-4734, Scopus Author ID: 6603959022, eLIBRARY SPIN-код: 4314-8184; vkhanov@yahoo.com

Пащенко Федор Александрович, генеральный директор, АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта „ЛенАэроПроект“», Российская Федерация, 198095, Санкт-Петербург, наб. Обводного канала, д. 122, лит. Б; lenair@lenair.ru

© Ханов Н.В., Пащенко Ф.А., 2021



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

Stress-strain state of reinforced concrete structures of the LN-1 and LN-2 retaining walls of Zagorskaya PSPP taking into account the opening of interblock joints and the formation of secondary cracks

Nartmir V. Khanov¹ , Fedor A. Pashchenko² 

¹Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

²JSC “LenAeroProekt”, Saint Petersburg, Russian Federation

 lenair@lenair.ru

Article history

Received: April 13, 2021

Revised: July 21, 2021

Accepted: July 28, 2021

Abstract. Relevance. The lower retaining walls of the water intake of the Zagorskaya PSPP perform the important function of protecting the pressure water conduits from the collapse of the soil mass. Two of them (LN-2 and LN-3) were reinforced with anchor rods. Considering the long period of operation (more than 25 years), certain deviations in the work during examinations and field observations were revealed. So, on the front face of the walls, extended horizontal cracks were recorded (opening of horizontal interblock joints and the emergence of secondary oblique cracks on the front surface of the walls). To carry out computational studies of the stress-strain state of the downstream retaining walls was required. *The purpose of the work* was to determine the stress-strain state of the lower retaining walls of the water intake of the Zagorskaya PSPP taking into account the opening of interblock joints and the formation of secondary oblique cracks. *Methods.* Computational studies of the stress-strain state of retaining walls were carried out within the framework of the method of numerical modeling of reinforced concrete structures of hydraulic structures based on finite element models. In finite element models, structural features of retaining walls were reproduced, including anchor rods, horizontal interblock joints, actual reinforcement, secondary oblique cracks. *Results.* The stress-strain state of the retaining walls was obtained. The stresses in the longitudinal and transverse reinforcement were determined, including when the structure was changed due to anchor rods. In horizontally transverse reinforcement, tensile stresses exceeding the yield point are recorded. It took the development of measures to strengthen the lower retaining walls.

Keywords: water intake, Zagorskaya PSPP, lower retaining walls, anchor rods, interblock joints, oblique secondary cracks, stress-strain state, finite element models

For citation

Khanov N.V., Pashchenko F.A. Stress-strain state of reinforced concrete structures of the LN-1 and LN-2 retaining walls of Zagorskaya PSPP taking into account the opening of interblock joints and the formation of secondary cracks. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(4):324–334. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-4-324-334>

Введение

Низовые подпорные стены водоприемника Загорской ГАЭС длительное время находятся в эксплуатации. При этом левосторонние стены ЛН-2 и ЛН-3 усилены анкерными тягами. Учитывая сезонные особенности работы анкерных тяг (в летний период они ослаблены, а в зимний период включаются в работу), эти стены претерпевают знакопеременные воздействия. В ходе натурных наблюдений и обследований были зафиксированы отклонения в работе от проектных предпосылок. Потребовалось проведение расчетных исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) низовых подпорных стен на основе конечно-элементного моделирования.

Методы

Для исследований НДС приняты характерные конструкции подпорных стен водоприемника ЛН-1 (работающей по консольной схеме) и ЛН-2 (работающей с анкерными тягами, качественно изменяющими характер работы стен). Для определения НДС подпорных стен ЛН-1 и ЛН-2 водоприемника Загорской ГАЭС разработаны математические конечно-элементные модели. При этом учтен отечественный и зарубежный опыт численных исследований подпорных стен и стен камер шлюзов [1–13].

Nartmir V. Khanov, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Hydraulic Structures, Institute of Amelioration, Water Management and Construction Named after A.N. Kostyakov, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 19 Pryanishnikova St, Moscow, 127550, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5764-4734, Scopus Author ID: 6603959022, eLIBRARY SPIN-код: 4314-8184; vkhanov@yahoo.com
Fedor A. Pashchenko, General Manager, JSC “LenAeroProekt”, 122B Naberezhnaya Obvodnogo Kanala, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; lenair@lenair.ru

В разработанных конечно-элементных моделях воспроизводились конструктивные особенности подпорных стен (горизонтальные межблочные швы, вторичные наклонные трещины, схемы армирования конструкции, анкерные тяги и др.); особенности характера действия нагрузок (включая давление воды и грунта в основании и в засыпке стен, противодействие в раскрывшихся межблочных швах и наклонных вторичных трещинах); физико-механические характеристики материалов сооружения, грунтов основания и засыпки подпорных стен и др. Схема подпорной стены с грунтовой засыпкой и грунтовыми водами представлена на рис. 1. Виды конечно-элементных моделей представлены на рис. 2 и 3.

Расчеты проводились итерационным путем. На каждом последующем этапе расчетов конечно-элементные модели корректировались с учетом полученных на предыдущих этапах результатов.

Схема моделирования противодействия воды в горизонтальном межблочном шве и в наклонной вторичной трещине показана на рис. 4.

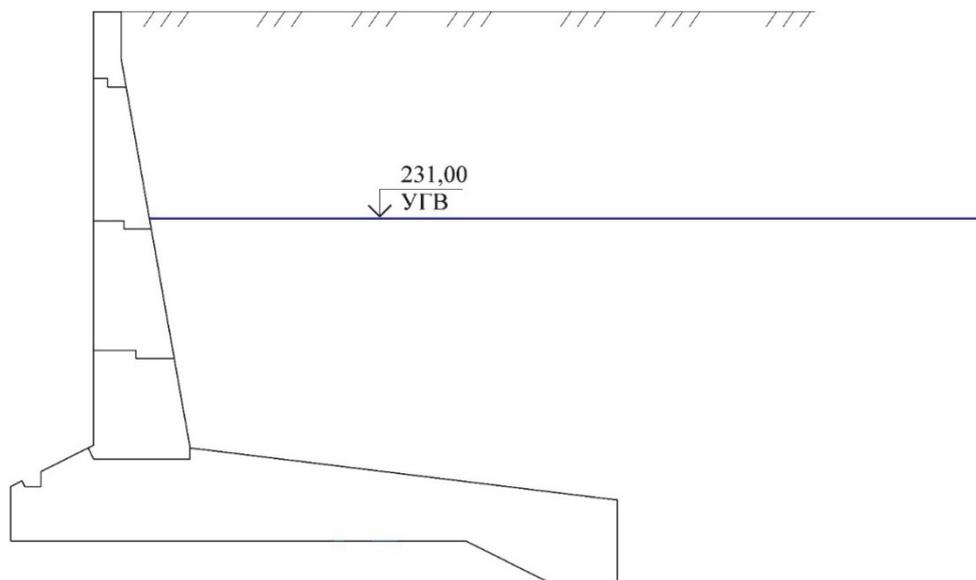


Рис. 1. Уровень грунтовой воды (на отметке 231,0 м) в обратной засыпке низовой подпорной стены водоприемника Загорской ГАЭС
Figure 1. Ground water level (at elevation 231,0 m) in the backfill of the lower retaining wall of the intake of the Zagorskaya PSHPP

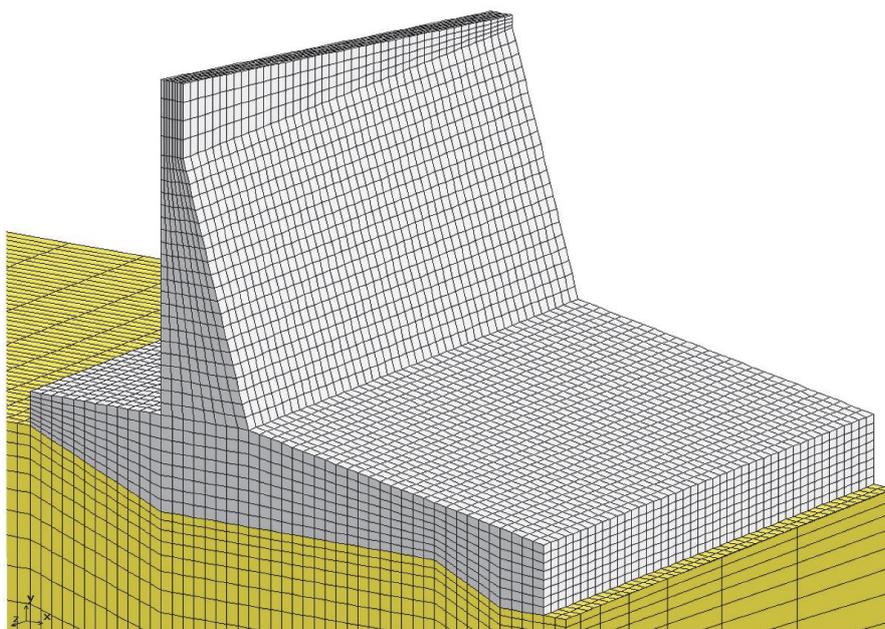


Рис. 2. Вид пространственной конечно-элементной модели подпорной стены ЛН-1
Figure 2. View of the spatial finite element model of the LN-1 retaining wall

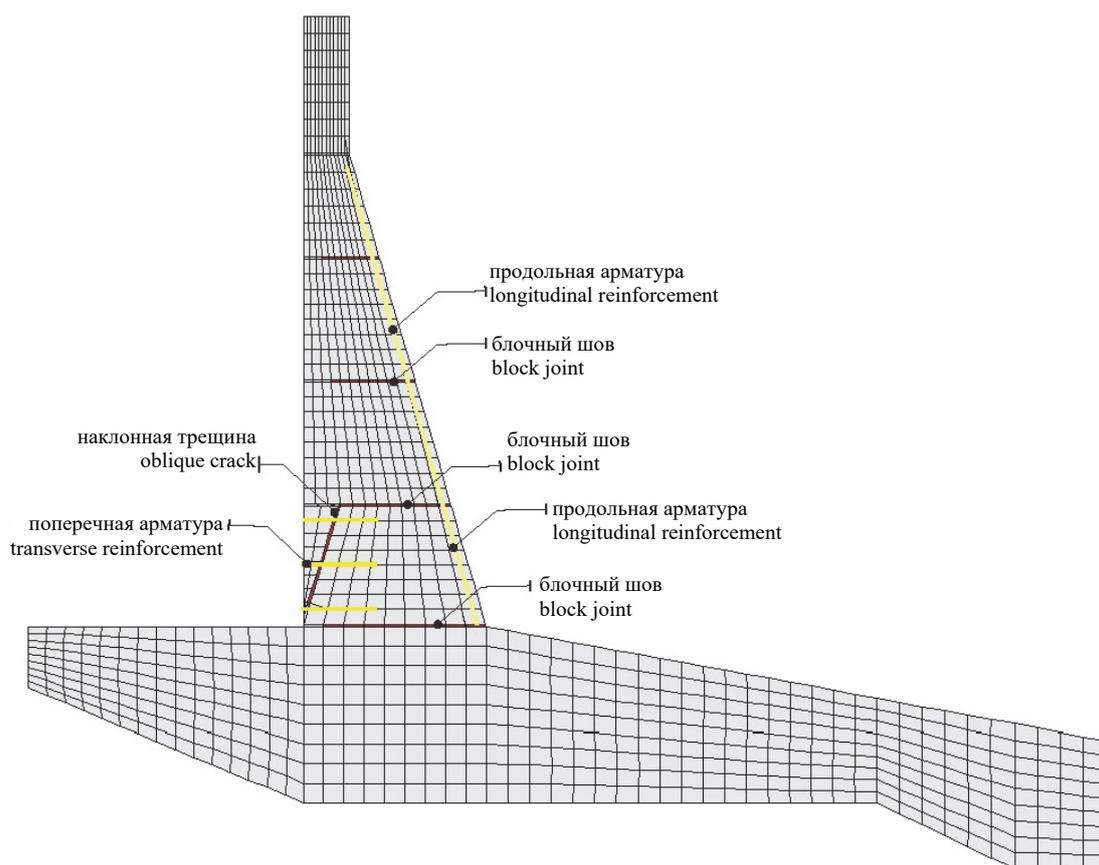


Рис. 3. Моделирование горизонтальной поперечной арматуры, пересекающей наклонную вторичную трещину
Figure 3. Modeling of the horizontal transverse reinforcement crossing an oblique secondary crack

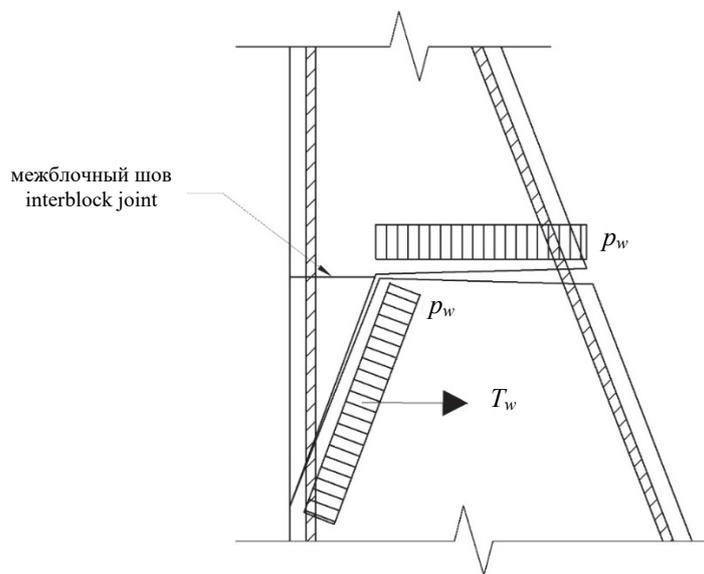


Рис. 4. Схема моделирования противодействия воды в горизонтальном межблочном шве и в наклонной вторичной трещине
Figure 4. Modeling scheme of water backpressure in a horizontal interblock joint and in an inclined secondary crack

Результаты и обсуждение

Результаты расчетов НДС подпорной стены ЛН-1 с учетом раскрытия межблочных швов. Выполненные на начальном этапе расчеты НДС в упругой постановке показали образование трещин по горизонтальным межблочным швам.

С учетом образования и раскрытия трещин по межблочным швам (а также действия противодействия воды в раскрывшихся швах) для вышеуказанных расчетных случаев получено распределение главных растягивающих напряжений в вершинах горизонтальных трещин. При этом направления главных растягивающих напряжений обозначили траектории продвижения наклонных вторичных трещин, образование и продвижение которых происходит в результате раскрытия межблочных швов.

Цветовые поля распределения растягивающих напряжений (в МПа), возникающих в процессе формирования наклонных вторичных трещин, выходящих из швов, для вышеуказанного расчетного случая представлены на рис. 5.

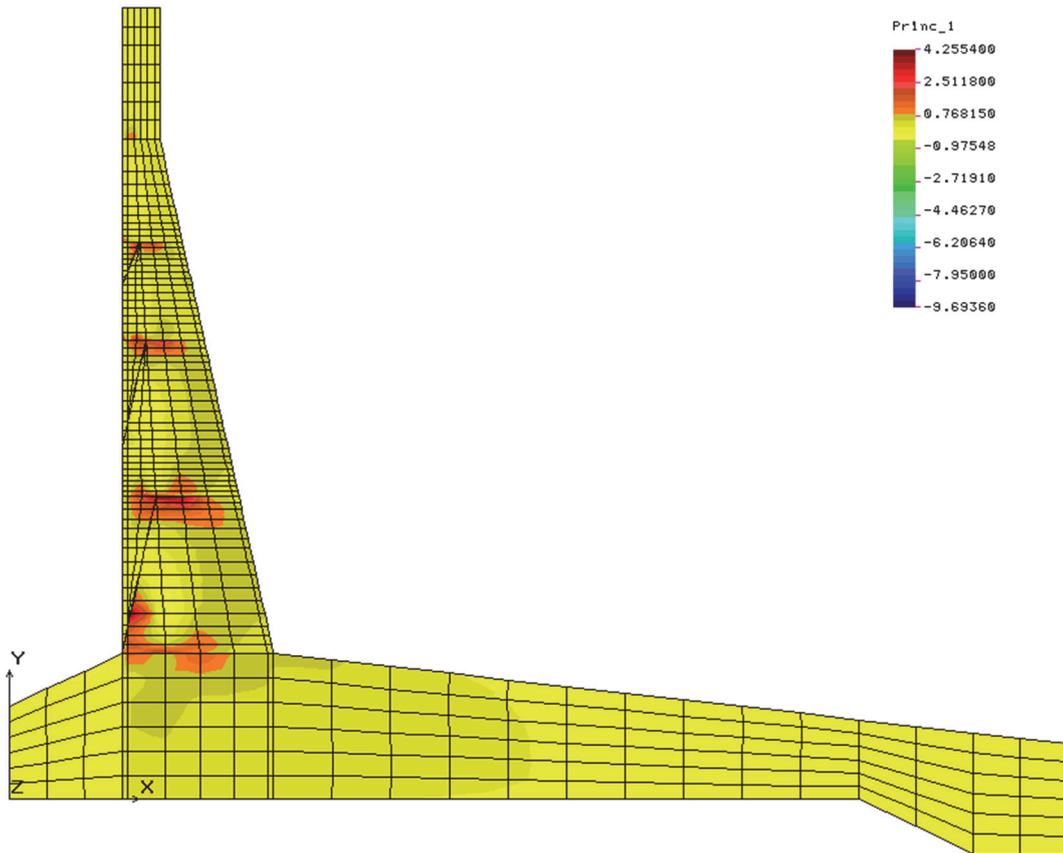


Рис. 5. Вторичные растягивающие напряжения, МПа, в элементах конструкции подпорной стены ЛН-1
Figure 5. The secondary tensile stresses, MPa, in structural elements of the LN-1 retaining wall]

Из анализа выполненных расчетов в *стадии работы с горизонтальными трещинами по швам* в конструкции нижней подпорной стены ЛН-1 можно заключить следующее.

В подпорной стене ЛН-1 возникают вторичные растягивающие напряжения, достигающие максимальной величины 4,3 МПа (в шве на отметке 230,8 м). Вторичные растягивающие напряжения (3,0 МПа) отмечаются также на отметке 235,3 м в месте расположения горизонтального межблочного шва.

Полученные величины вторичных растягивающих напряжений вызывают образование вторичных наклонных трещин, выходящих из горизонтальных межблочных швов с выходом на лицевую грань стены.

Результаты расчетов НДС подпорной стены ЛН-1 с учетом раскрытия межблочных швов и образования вторичных трещин. Для определения напряжений в арматуре с учетом фактического армирования стены проведены расчеты НДС на стадии раскрытия межблочных швов и образования вторичных наклонных трещин для вышеприведенных расчетных случаев (с учетом действия противодействия воды в раскрывшихся швах и наклонных трещинах). В том числе в конечно-элементных моделях воспроизведены вторичные наклонные трещины, пересекающие поперечную арматуру.

При этом смоделировано размещение поперечной арматуры в зонах прохождения вторичных наклонных трещин (под межблочными швами), развитие которых происходит из вершин трещин по раскрывшимся горизонтальным межблочным швам.

Расположение расчетных сечений представлено на рис. 6.

Результаты расчетов по определению напряжений в продольной и поперечной арматуре с учетом фактического армирования представлены в табл. 1. Как следует из табл. 1, напряжения в горизонтальной поперечной арматуре в зонах вторичных трещин достигают 524,7 МПа, что превышает расчетное сопротивление поперечной арматуры класса А-II, равное $R_{sw} = 230$ МПа. Данные результаты свидетельствуют о недостаточном количестве установленной горизонтальной поперечной арматуры. Напряжения в продольной арматуре у тыловой грани достигают 240,6 МПа.

Таблица 1

Результаты расчетов стены ЛН-1 по определению напряжений в продольной и поперечной арматуре с учетом фактического армирования

Стена	№ сечения	Отметка межблочного шва, м	Напряжения σ_s в продольной арматуре у тыловой грани, МПа	Напряжения σ_{sw} в горизонтальной поперечной арматуре, пересекающей вторичные трещины, МПа
ЛН-1	1–1	226,3	240,6	–
	2–2	230,8	211,9	524,7
	3–3	235,3	155,4	343,0

Table 1

The calculations results of the wall LN-1 to determine stresses in longitudinal and transverse reinforcement, taking into account the actual reinforcement

The wall	Section number	Interblock joint mark, m	Stresses σ_s in longitudinal reinforcement at the rear face, MPa	Stresses σ_{sw} in horizontal transverse reinforcement crossing secondary cracks, MPa
ЛН-1	1–1	226.3	240.6	–
	2–2	230.8	211.9	524.7
	3–3	235.3	155.4	343.0

На рис. 7 представлено деформированное состояние железобетонной конструкции подпорной стены ЛН-1 с учетом раскрытия межблочных швов и образования вторичных наклонных трещин.

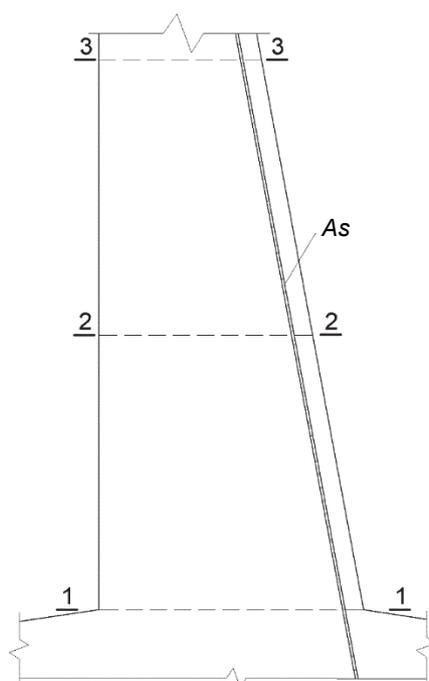


Рис. 6. Схема расположения расчетных сечений
Figure 6. Layout diagram of design sections

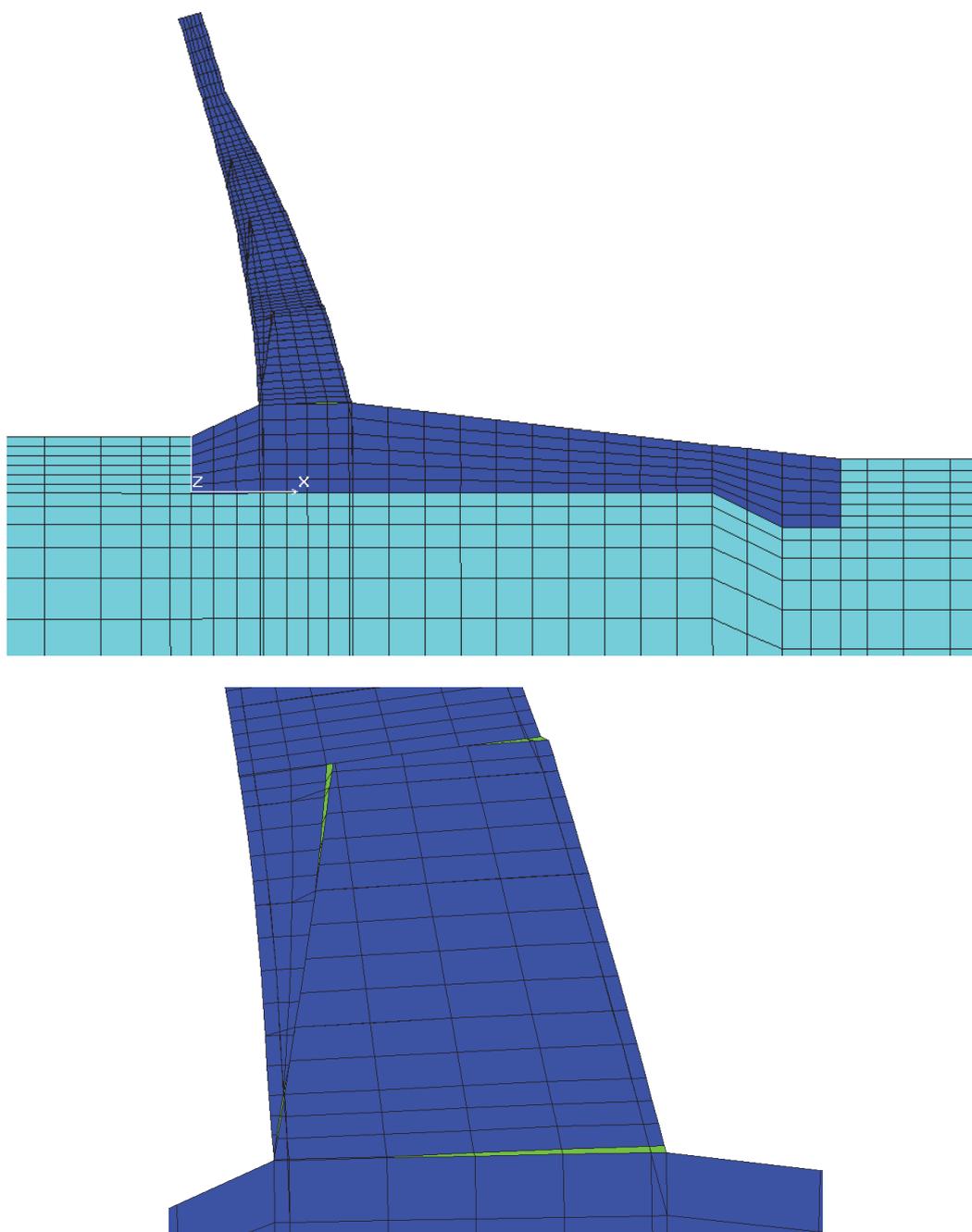


Рис. 7. Деформированное состояние конструкции подпорной стены ЛН-1 с учетом раскрытия межблочных швов и образования вторичных трещин
Figure 7. The deformed state of the retaining wall construction LN-1 taking into account the disclosure interblock joints and secondary cracks formation

Результаты расчетов НДС подпорной стены ЛН-2 с учетом раскрытия межблочных швов в случае работы с анкерными тягами. Для определения напряжений в арматуре с учетом фактического армирования стены ЛН-2 проведены расчеты НДС на стадии раскрытия межблочных швов в случае работы с анкерными тягами.

При этом происходит качественное изменение схемы работы стены, наличие анкерных тяг вызывает растяжение лицевой грани стены и раскрытие горизонтальных швов с лицевой стороны. В лицевой конструктивной арматуре (не предназначенной для восприятия значительного растяжения) возникают не предусмотренные проектом значительные растягивающие напряжения.

На рис. 8 представлено деформированное состояние железобетонной конструкции подпорной стены ЛН-2 с учетом раскрытия межблочных швов в случае работы с анкерными тягами.

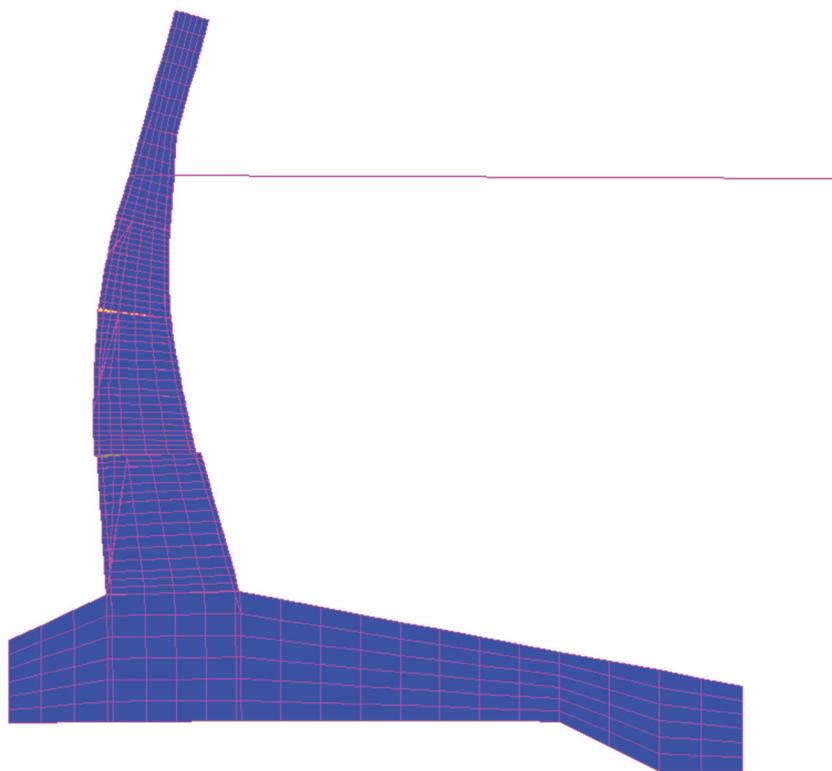


Рис. 8. Деформированное состояние подпорной стены ЛН-2 в случае работы стены с анкерными тягами
Figure 8. The deformed state of the retaining wall LN-2 in the case of wall operation with anchor rods

Результаты расчетов по определению напряжений в продольной арматуре с учетом фактического армирования представлены в табл. 2. Как следует из табл. 2, в случае работы стены ЛН-2 с анкерными тягами максимальные напряжения в продольной арматуре у лицевой грани достигают 287,9 МПа (в сечении 3), максимальные напряжения в продольной арматуре у тыловой грани достигают 50,9 МПа (сечение 1).

Таблица 2

Результаты расчетов стены ЛН-2 по определению напряжений в продольной арматуре с учетом фактического армирования в случае работы с анкерными тягами

Стена	№ сечения	Отметка межблочного шва, м	Напряжения σ_s в продольной арматуре у лицевой грани, МПа	Напряжения σ_s в продольной арматуре у тыловой грани, МПа
ЛН-2	1–1	225,8	–18,1	50,9
	2–2	230,1	144,7	–23,6
	3–3	234,3	287,9	–36,8

Table 2

The calculations results of the wall LN-2 to determine stresses in longitudinal reinforcement, taking into account the actual reinforcement in the case of work with anchor rods

The wall	Section number	Interblock joint mark, m	Stresses σ_s in longitudinal reinforcement at the front face, MPa	Stresses σ_s in longitudinal reinforcement at the rear face, MPa
ЛН-2	1–1	225.8	–18.1	50.9
	2–2	230.1	144.7	–23.6
	3–3	234.3	287.9	–36.8

Анализ состояния и оценка дальнейшей эксплуатации железобетонных конструкций низовых подпорных стен водоприемника. Анализ результатов проведенных натурных обследований показал, что на лицевой поверхности низовых подпорных стен водоприемника Загорской ГАЭС обнаружены протяженные горизонтальные трещины шириной раскрытия до 0,4 мм. Образование горизонтальных трещин свидетельствует о раскрытии горизонтальных межблочных швов и о выходе наклонных вторичных трещин на лицевую поверхность стен.

Расчетные исследования НДС и прочности железобетонных конструкций подпорных стен подтвердили образование вторичных наклонных трещин, выходящих из горизонтальных межблочных швов, а также образование сквозных трещин по горизонтальным швам, отделяющих верхнюю часть стен от остального массива стен (в случае работы стен с анкерными тягами). То есть первоначально происходило раскрытие горизонтальных швов с тыловой стороны (при сезонном ослаблении анкерных тяг), а из-за влияния анкерных тяг раскрытие швов происходило с лицевой стороны.

Из расчетов НДС подпорной стены ЛН-1 на основе конечно-элементных моделей получены траектории вторичных наклонных трещин и значения напряжений в поперечной арматуре (более 500 МПа) в зонах моделирования вторичных наклонных трещин.

Моделирование работы стены ЛН-2 с анкерными тягами показало образование трещин по горизонтальным швам, раскрывающихся с лицевой стороны вследствие изменения расчетных схем из-за наличия анкерной тяги, с высоким уровнем растягивающих напряжений в лицевой арматуре (около 300 МПа), которые могут еще возрасти при непредусмотренных проектом воздействиях.

Проведенные расчеты железобетонных конструкций подпорных стен показали, что требуется расчетное поперечное армирование в количестве более 30 см² на ширину 1 п. м и на 1 п. м высоты стен, в то время как в стенах установлено чисто конструктивное горизонтальное поперечное армирование.

Таким образом, для обеспечения дальнейшей безопасной эксплуатации низовых подпорных стен рекомендуется их усиление.

При этом в подпорных стенах, работающих по консольной схеме (без анкерных тяг), рекомендуется установить наклонные арматурные стержни в пробуренные отверстия со стороны лицевой поверхности стен для восприятия поперечных усилий и вторичных напряжений и для предотвращения развития вторичных наклонных трещин. Принципиальная схема усиления подпорных стен со стороны лицевой грани представлена на рис. 9.

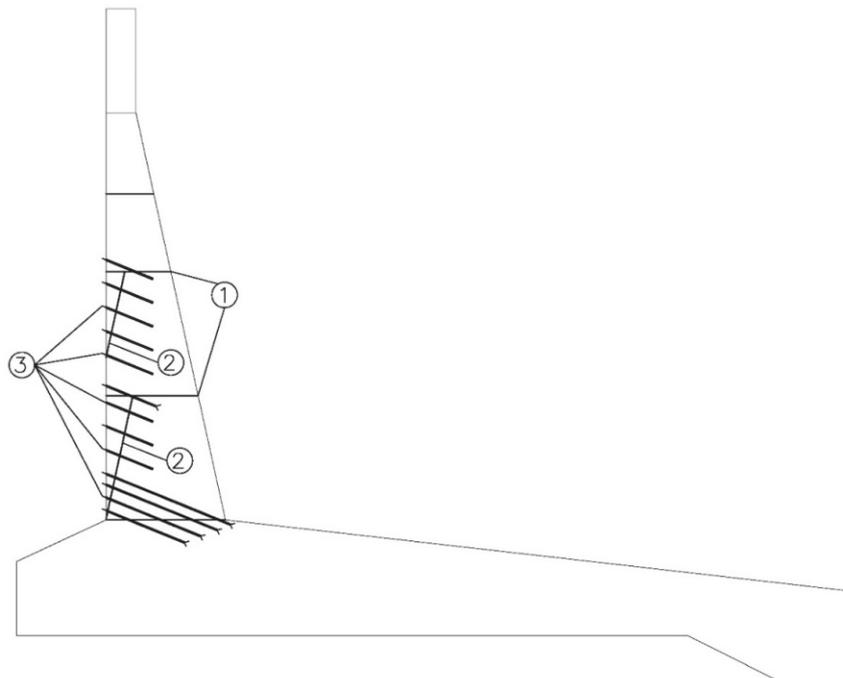


Рис. 9. Принципиальная схема усиления подпорных стен со стороны лицевой грани:

1 – горизонтальные межблочные швы; 2 – вторичные наклонные трещины; 3 – арматурные стержни, установленные в пробуренные скважины

Figure 9. Schematic diagram of the reinforcement of retaining walls from the side of the front face:

1 – horizontal interblock joints; 2 – secondary oblique cracks; 3 – reinforcing bars installed in drilled wells

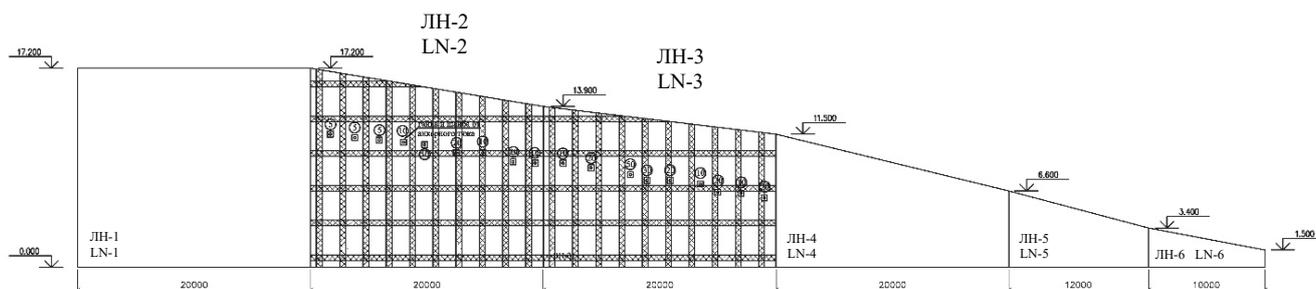


Рис. 10. Принципиальная схема усиления лицевой грани стен ЛН-2 и ЛН-3 углеродными лентами
Figure 10. Schematic diagram of reinforcing the front face of the walls of LN-2 and LN-3 with carbon tapes

В подпорных стенах ЛН-2 и ЛН-3, работающих с анкерными тягами, рекомендуется усиление со стороны лицевой грани стен посредством внешнего армирования углеродными лентами. Принципиальная схема усиления лицевой грани стен ЛН-2 и ЛН-3 углеродными лентами представлена на рис. 10.

Заключение

Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния выполнялись на основе математических конечно-элементных моделей подпорных стен ЛН-1 и ЛН-2 для двух расчетных случаев: работы стен без анкерных тяг (для ЛН-1) и с анкерными тягами (для ЛН-2). В конечно-элементных моделях воспроизводилось давление грунта и грунтовой воды на тыловую грань стены (при УГВ = 231,0 м), а также противодавление воды в раскрывшихся горизонтальных межблочных швах и наклонных вторичных трещинах.

Была усовершенствована методика моделирования подпорных стен с учетом горизонтальных межблочных швов, образования вторичных наклонных трещин, выходящих из швов, а также продольного и горизонтального поперечного стержневого армирования.

Из расчетов НДС подпорной стены ЛН-1 на основе конечно-элементных моделей получены траектории вторичных наклонных трещин и значения напряжений в поперечной арматуре (более 500 МПа) в зонах моделирования вторичных наклонных трещин. Недостаточное количество горизонтальной поперечной арматуры требует усиления подпорных стен в зонах горизонтальных межблочных швов. На рис. 9 представлена принципиальная схема усиления подпорных стен посредством наклонных арматурных стержней в зонах горизонтальных межблочных швов.

Моделирование работы стены ЛН-2 с анкерными тягами показало образование трещин по горизонтальным швам, раскрывающихся с лицевой стороны вследствие изменения расчетных схем из-за наличия анкерных тяг. При этом требуется усиление стен ЛН-2 и ЛН-3 со стороны лицевой грани. На рис. 10 показана принципиальная схема усиления подпорных стен ЛН-2 и ЛН-3 углеродными лентами со стороны лицевой грани.

Список литературы

1. Лисичкин С.Е. Расчетные исследования устойчивости и прочности подпорных стен первого яруса водоприемника Загорской ГАЭС // *Природообустройство*. 2012. № 2. С. 44–48.
2. Рубин О.Д., Захаров И.Б., Лисичкин С.Е. Оценка состояния автодорожного моста Павловской ГЭС и расчетно-экспериментальное обоснование мероприятий по его усилению // *Энергетическое строительство*. 1994. № 9. С. 47–50.
3. Лисичкин С.Е., Рубин О.Д., Нефедов А.В. и др. Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния подпорной стенки первого яруса ЛВ-1 водоприемника Загорской ГАЭС, в том числе с учетом данных синхронных замеров при суточном изменении уровня верхнего аккумулирующего бассейна // *Безопасность гидротехнических сооружений*. 2013. Вып. 18. С. 38–50.
4. Рубин О.Д., Баклыков И.В., Антонов А.С. и др. Инструментальные и расчетные исследования низовых подпорных стен Загорской ГАЭС // *Природообустройство*. 2019. № 2. С. 80–88. <https://doi.org/10.34677/1997-6011/2019-2-80-88>
5. Рубин О.Д., Пономарев Д.И., Мельникова Н.И. Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния подпорных стен первого яруса водоприемника Загорской ГАЭС // *Природообустройство*. 2011. № 5. С. 51–55.

6. Ксенофонтова Т.К., Ню Ф. Железобетонные подпорные стены, выбор расстояния между контрфорсами // Проблемы развития мелиорации и водного хозяйства и пути их решения. Ч. III. Безопасность гидротехнических сооружений: сборник материалов Международной научно-практической конференции (Москва, 11–12 апреля 2011 г.). М., 2011. С. 106–111.

7. Ahmadi-Nedushan B., Varaee H. Optimal design of reinforced concrete retaining walls using a swarm intelligence technique // Proceedings of the First International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering. Stirlingshire: Civil-Comp Press, 2009. Paper 26. Pp. 332–343. <https://doi.org/10.4203/ccp.92.26>

8. Nikolaev V.B., Gun S.Ya., Lisichkin S.E., Lyapin O.B. Strength of reinforced-concrete retaining walls // Hydro-technical Construction. 1988. Vol. 22. No. 10. Pp. 616–621. <https://doi.org/10.1007/BF01429034>

9. Chauhan V.B., Murty D., Gade V.K. Investigation of failure of a rigid retaining wall with relief shelves // Japanese Geotechnical Society Special Publication. 2016. Vol. 2. No. 73. Pp. 2492–2497. <https://doi.org/10.3208/jgssp.TC302-02>

10. Chauhan V.B., Murty D. Behaviour of rigid retaining wall with relief shelves with cohesive backfill // 5th International Conference on Forensic Geotechnical Engineering (Bangalore, 8–10 December 2016). Bangalore, 2016. Pp. 350–357.

11. Pei Y., Xia Y. Design of reinforced cantilever retaining walls using heuristic optimization algorithms // Procedia Earth and Planetary Science. 2012. No. 5. Pp. 32–36. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2012.01.006>

12. Федорова Т.С. Напряженно-деформированное состояние стен камер шлюзов канала имени Москвы: дис. ... к.т.н. М., 2017. 145 с.

13. Wu Y., He S., Li X. Failure mechanism and seismic design of retaining wall in earthquake // Environmental Earth Sciences. 2012. Vol. 65. Pp. 1013–1019. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1462-5>

References

1. Lisichkin S.Ye. Computational studies of the stability and strength of the first tier retaining walls of Zagorskaya PSPP intake. *Prirodoobustroystvo*. 2012;(2):44–48. (In Russ.)

2. Rubin O.D., Zakharov I.B., Lisichkin S.Ye. Assessment of the state of the Pavlovsk HPS road bridge and calculation and experimental substantiation of strengthen measures of it. *Energeticheskoye Stroitel'stvo*. 1994;(9):47–50. (In Russ.)

3. Lisichkin S.Ye., Rubin O.D., Nefedov A.V. et al. Computational studies of the stress-strain state of the first tier retaining wall LV-1 of Zagorskaya PSPP water intake, including taking into account synchronous measurements with daily changes in the level of the upper accumulating basin. *Bezopasnost' Gidrotekhnicheskikh Sooruzheniy*. 2013;(18):38–50. (In Russ.)

4. Rubin O.D., Baklykov I.V., Antonov A.S. et al. Instrumental and calculated investigations of lower retaining walls of the Zagorskaya PSPP. *Prirodoobustroystvo*. 2019;(2):80–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.34677/1997-6011/2019-2-80-88>

5. Rubin O.D., Ponomarev D.I., Melnikova N.I. Computational studies of the stress-strain state of the first tier retaining walls of Zagorskaya PSPP water intake. *Prirodoobustroystvo*. 2011;(5):51–55. (In Russ.)

6. Ksenofontova T.K., Nyu F. Reinforced concrete retaining walls, the choice of the distance between buttresses. *Problems of Development of Land Reclamation and Water Management and Ways to Solve Them: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference (Moscow, 11–12 April 2011)*. Moscow; 2011. p. 106–111. (In Russ.)

7. Ahmadi-Nedushan B., Varaee H. Optimal design of reinforced concrete retaining walls using a swarm intelligence technique. *Proceedings of the First International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering* (paper 26). Stirlingshire: Civil-Comp Press; 2009. p. 332–343. <https://doi.org/10.4203/ccp.92.26>

8. Nikolaev V.B., Gun S.Ya., Lisichkin S.E., Lyapin O.B. Strength of reinforced-concrete retaining walls. *Hydro-technical Construction*. 1988;22(10):616–621. <https://doi.org/10.1007/BF01429034>

9. Chauhan V.B., Murty D., Gade V.K. Investigation of failure of a rigid retaining wall with relief shelves. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. 2016;2(73):2492–2497. <https://doi.org/10.3208/jgssp.TC302-02>

10. Chauhan V.B., Murty D. Behaviour of rigid retaining wall with relief shelves with cohesive backfill. *5th International Conference on Forensic Geotechnical Engineering* (Bangalore, 8–10 December 2016). Bangalore; 2016. p. 350–357.

11. Pei Y., Xia Y. Design of reinforced cantilever retaining walls using heuristic optimization algorithms. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2012;(5):32–36. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2012.01.006>

12. Fedorova T.S. *The stress-strain state of the walls of the lock chambers of the Moscow Canal* (Thesis of Candidate of Technical Sciences). Moscow; 2017. (In Russ.)

13. Wu Y., He S., Li X. Failure mechanism and seismic design of retaining wall in earthquake. *Environmental Earth Sciences*. 2011;65(4):1013–1019. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1462-5>