

Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-2-41-47>

УДК 626/627:693.5:624.137.5:539.4



ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЯХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПОДПОРНЫХ СТЕН

Ф.А. Пащенко^{1✉}, Н.С. Харьков¹, Н.В. Ханов², С.Н. Редников²

¹АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта «Ленаэропроект»; 198095, г. Санкт-Петербург, наб. Обводного канала, 122, лит. Б, Россия

²Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; ул. Прянишникова, 19, Россия

Аннотация. В гидротехническом и транспортном строительстве находят широкое применение подпорные стены, возведенные из железобетона. Поскольку их тыловые грани закрыты грунтовой засыпкой, контролировать напряженное состояние тыловой рабочей арматуры затруднительно, что в ряде случаев привело к отклонениям в работе конструкций от проекта. В статье рассматриваются подпорные стены углового типа. Цель исследований – разработка и апробация инженерной методики определения напряженного состояния в горизонтальных сечениях подпорных стен, выполненных из железобетона. В рамках работы проводились исследования конструкций подпорных стен из железобетона, которые взаимодействуют с грунтами основания и обратной засыпки. При этом с использованием положений строительной механики и теории железобетона была разработана инженерная методика, позволяющая рассчитывать напряженное состояние подпорных стен из железобетона по горизонтальным сечениям. Для апробации предложенной методики расчета были использованы натурные данные инструментальных обследований эксплуатируемых низовых подпорных стен водоприемника ГАЭС (гидроаккумулирующая электростанция) на основе метода разгрузки арматуры применительно к лицевой конструктивной арматуре стен. Разработанная методика была практически реализована для оценки действующих растягивающих напряжений в тыловой рабочей арматуре, а также сжимающих напряжений в бетоне подпорных стен.

Ключевые слова: подпорные стены, инженерная методика, напряженное состояние, лицевая арматура, тыловая арматура, сжатая зона, метод разгрузки арматуры

Формат цитирования: Пащенко Ф.А., Харьков Н.С., Ханов Н.В., Редников С.Н. Практическая реализация инженерной методики определения напряженного состояния в горизонтальных сечениях железобетонных подпорных стен // Природообустройство. 2024. № 2. С. 41-47. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-2-41-47>

Original article

PRACTICAL IMPLEMENTATION OF THE ENGINEERING METHOD FOR DETERMINING THE STRESS STATE IN HORIZONTAL SECTIONS OF REINFORCED CONCRETE RETAINING WALLS

F.A. Pashchenko¹, N.S. Kharkov¹, N.V. Khanov², S.N. Rednikov²

¹AO "Design, Survey and Research Institute of Air Transport "Lenaeroproekt"; 198095, St. Petersburg, nab. Bypass canal, 122, lit. B, Russia

²Russian State Agrarian University – K.A. Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya str., Moscow, 127434; A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction; 19, Pryanishnikova str., Russia

Abstract. Retaining walls made of reinforced concrete are widely used in hydraulic engineering and transport construction. Since their rear faces are covered with ground filling, it seems difficult to control the stressed state of the rear working fittings, which in some cases led to deviations

in the work of structures from the project. In this article, corner type retaining walls are considered. The purpose of the work was to develop and test an engineering technique for determining the stress state in horizontal sections of retaining walls made of reinforced concrete. In the framework of this work, studies were conducted on the structures of reinforced concrete retaining walls that interact with the soils of the base and backfill. At the same time, using the provisions of structural mechanics and the theory of reinforced concrete, an engineering technique was developed that allows calculating the stress state of reinforced concrete retaining walls along horizontal sections. To test the proposed calculation methodology, the in-situ data of instrumental surveys of the operated lower retaining walls of the PSPP water intake (pumped storage power plant) were used on the basis of the “reinforcement unloading” method in relation to the facing structural reinforcement of the walls. The developed method was practically implemented to assess the effective tensile stresses in the rear working reinforcement, as well as the compressive stresses in the concrete of retaining walls.

Keywords: retaining walls, engineering methodology, stress state, facing reinforcement, rear reinforcement, compressed zone, “reinforcement unloading” method

Format of citation: Pashchenko F.A., Kharkov N.S., Khanov N.V., Rednikov S.N. Practical implementation of engineering methods for determining the stress state in horizontal sections of reinforced concrete retaining walls // Prirodoobustroystvo. 2024. No. 2. P. 41-47. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-2-41-47>

Введение. В гидротехническом, а также в транспортном строительстве (например, при строительстве насыпных грунтовых сооружений аэропортов) широко применяются подпорные стены, в том числе углового типа [1-7]. При этом в нормативных документах о расчетах подпорных стен (СП 101.13330.2023) отсутствуют положения, связанные с определением армирования; имеется ссылка на нормы по расчетам железобетонных конструкций гидросооружений (СП 41.13330.2012). Отсюда подавляющий объем исследований подпорных стен связан с определением нагрузок на тыловую грань стен и др., но не связан с совершенствованием методик их армирования.

В ходе эксплуатации в тыловой рабочей арматуре подпорных стен из железобетона могут возникать значительные по величине растягивающие напряжения. Поскольку доступ к тыловой арматуре затруднителен ввиду наличия обратной грунтовой засыпки, не представляется возможным контролировать состояние тыловой арматуры.

Как показывает опыт эксплуатации подпорных стен углового типа, неконтролируемое напряженное состояние (в том числе в тыловой рабочей арматуре) может привести к отклонениям от проектных предпосылок и даже к разрушению указанных конструкций [8-14].

На основе положений Федерального закона от 21 июля 1997 г. № 177-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» [15] требуется обеспечение соответствующего уровня безопасности подпорных сооружений.

Существующие методики расчета подпорных стен, в том числе положения нормативных

документов, не учитывают всех характерных особенностей, отмечаемых в работе подпорных стен из железобетона [16-18]. При этом в ряде случаев имеется возможность получить натурные данные о величинах напряжений в конструктивной арматуре лицевой грани подпорных стен (например, на основе метода разгрузки арматуры).

Возникла необходимость в разработке методики расчета напряжений в арматуре и бетоне подпорных стен из железобетона по горизонтальным сечениям.

Цель исследований: разработка и апробация инженерной методики определения напряженного состояния в горизонтальных сечениях подпорных стен, выполненных из железобетона.

Материалы и методы исследований. Подпорные стены, выполненные из железобетона, взаимодействуют с окружающим грунтом основания и обратной засыпки. Нагрузка от грунта засыпки на тыловую грань подпорных стен определялась с использованием зависимостей механики грунтов [19-25].

В процессе разработки инженерной методики, позволяющей определить напряжения в арматуре и бетоне подпорных стен из железобетона по горизонтальным сечениям, использовались зависимости строительной механики и теории железобетона.

Практическое использование предложенной методики расчета выполнялось с учетом натурных данных инструментальных обследований эксплуатируемых низовых подпорных стен водоприемника ГАЭС на основе метода разгрузки арматуры, касающихся лицевой конструктивной арматуры этих стен.

Для реализации метода разгрузки арматуры производилось оголение исследуемых арматурных стержней путем вырубки штраб в бетоне лицевой грани. Далее на оголенные участки арматуры устанавливались деформометры, снимались «нулевые» отсчеты. Арматурные стержни разрезались, и после этого снимались отсчеты по деформометрам. На основании разницы показаний деформометров до разрезки арматурных стержней и после разрезки определялись относительные деформации арматуры. С использованием закона Гука вычислялись величины напряжений в арматурных стержнях, которые действовали до проведения разгрузки арматуры.

У лицевой грани стен установлена арматура класса А-III, у тыловой грани стен установлена арматура классов А-II и А-III. Если при разработке штраб в бетоне лицевой грани для оголения арматурных стержней в рамках последующего определения напряжений методом разгрузки арматуры имелся доступ к арматурным стержням (и был определен класс арматуры), то доступ к арматурным стержням, установленным у тыловой грани, отсутствовал.

Результаты и их обсуждение. Для определения напряжений в арматуре и бетоне подпорных стен из железобетона по горизонтальным сечениям предлагается инженерная методика расчета [26].

На основе указанной методики представляется возможным рассчитать величину напряжений в тыловой растянутой арматуре и в сжатом бетоне стены, используя данные о сжимающих напряжениях в лицевой конструктивной арматуре, полученные методом разгрузки арматуры в ходе инструментального обследования подпорных стен.

На рисунке 1 представлена расчетная схема горизонтального сечения подпорной стены, выполненной из железобетона.

На основе расчетной схемы (рис. 1) были составлены условия равновесия вертикальных сил в расчетном горизонтальном сечении.

Условие равновесия вертикальных сил:

$$N_b + N'_s + Nw = N + N_s, \quad (1)$$

где N – внешнее сжимающее усилие; N_b – усилие сжатия бетона; N'_s – усилие сжатия лицевой конструктивной арматуры; N_s – усилие растяжения тыловой рабочей арматуры; Nw – усилие растяжения, вызванное действием противодавления воды p_w в горизонтальной трещине.

Следует отметить, что распределение сжимающих напряжений σ_b в бетоне принималось по треугольному закону, что характерно для массивной гидротехнической конструкции.

Уравнение равновесия изгибающих моментов от усилий, показанных на рисунке 1, принимает вид:

$$N(e_0 - 0,5h + 0,33x) + \frac{Nw(3h + 5x)}{12} = N_s(h_0 - 0,33x) + N'_s(0,33x - a), \quad (2)$$

где h – размер высоты сечения; h_0 – размер рабочей высоты сечения; e_0 – эксцентриситет приложения действующей силы N ; x – размер высоты сжатой зоны; a' и a – величина защитного слоя бетона для лицевой и тыловой арматуры.

На основе применения гипотезы плоских сечений были определены соотношения относительных деформаций сжатого бетона ε_b , а также растянутой (ε_s) и сжатой (ε'_s) арматуры:

$$\begin{aligned} \varepsilon_b(h_0 - x) &= \varepsilon_s x; \\ \varepsilon_s(x - a) &= \varepsilon'_s(h_0 - x). \end{aligned} \quad (3)$$

С использованием соотношений (3) были получены расчетные зависимости для сжимающих напряжений σ_b в бетоне, растягивающих и сжимающих напряжений в арматуре (σ_s и σ'_s):

$$\sigma_b = \varepsilon_b \cdot E_b; \quad \sigma'_s = \varepsilon'_s \cdot E_s; \quad \sigma_s = \varepsilon_s \cdot E_s. \quad (4)$$

На рисунке 2 представлены эпюры деформаций (а) и напряжений (б) материалов конструкции по горизонтальному сечению.

Таким образом, были получены расчетные зависимости, связывающие деформации и напряжения в бетоне и арматуре подпорной стены:

$$\varepsilon_b = \left(\frac{x}{h_0 - x} \right) \varepsilon_s; \quad (5)$$

$$\varepsilon'_s = \frac{(x - a)}{(h_0 - x)} \varepsilon_s; \quad (6)$$

$$\sigma_b = \left(\frac{x}{h_0 - x} \right) \sigma_s \frac{E_b}{E_s}; \quad (7)$$

$$\sigma'_s = \frac{(x - a)}{(h_0 - x)} \sigma_s. \quad (8)$$

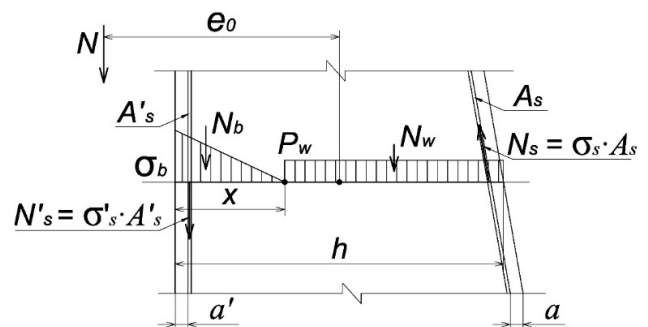


Рис. 1. Схема действия усилий в горизонтальном сечении подпорной стены

Fig. 1. Diagram of the action of forces in the horizontal section of the retaining wall

Растягивающие напряжения в арматуре тыловой грани σ_s определяются по формуле:

$$\sigma_s = \frac{N(h_0 - x)}{D},$$

где

$$D = \left[0,5bx^2 \left(\frac{E_b}{E_s} \right) + A_s(x - a) - A_s(h_0 - x) \right]. \quad (9)$$

С учетом противодействия воды p_w в трещине (шве)

$$\sigma_s = \frac{N(h_0 - x)}{D} + \frac{p_w(h - x)b}{A_s}. \quad (10)$$

Растягивающие напряжения в арматуре тыловой грани σ_s (без учета конструктивной арматуры, установленной у лицевой грани) определяются по формуле:

$$\sigma_s = \frac{N}{\left[0,5 \left(\frac{x}{h_0 - x} \right) \frac{E_b}{E_s} \right] xb - A_s}. \quad (11)$$

С учетом противодействия воды в трещине (шве)

$$\sigma_s = \frac{N}{\left[0,5 \left(\frac{x}{h_0 - x} \right) \frac{E_b}{E_s} \right] xb - A_s} + \frac{p_w(h - x)b}{A_s}. \quad (12)$$

Напряжения σ_b и σ'_s вычисляются в соответствии с (7) и (8).

Таким образом, была разработана инженерная методика, которая позволяет рассчитать величины напряжений в бетоне, а также в лицевой и в тыловой арматуре подпорной стены [26, 27]. Разработанная инженерная методика была применена при определении компонентов напряженного состояния горизонтальных сечений эксплуатируемых низовых подпорных стен водоприемника ГАЭС. Были использованы также натурные данные, касающиеся физико-механических характеристик бетона данных подпорных стен (табл. 1).

Результаты произведенных расчетов величин напряжений в арматуре и бетоне низовых подпорных стен водоприемника ГАЭС сведены в таблицу 2.

Произведенные в рамках предлагаемой методики расчеты показали, что растягивающие напряжения в тыловой арматуре подпорной стены (291,7 МПа) вплотную приблизились к значению предела текучести, равного 300 МПа для арматуры класса А-П.

Возникает необходимость регулярного контроля величин напряжений в низовых подпорных стенах водоприемника ГАЭС. Может потребоваться усиление данных подпорных стен при дальнейшем росте напряжений в рабочей тыловой арматуре.

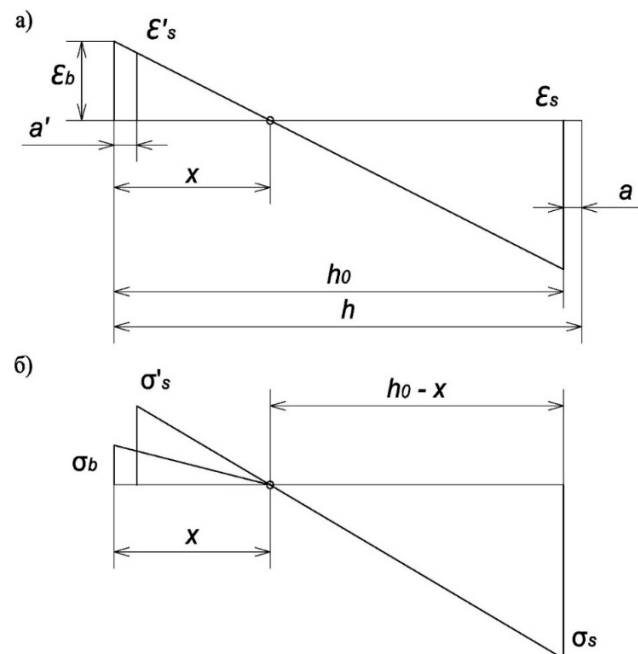


Рис. 2. Эпюры деформаций (а) и напряжений (б) материалов по горизонтальному сечению конструкции

Fig. 2. Diagrams of deformations (a) and stresses (b) of materials along the horizontal cross-section of the structure

Таблица 1. Физико-механические характеристики бетона низовых подпорных стен водоприемника ГАЭС

Table 1. Physical and mechanical characteristics of the concrete of the lower retaining walls of the PSPP water intake

Номера контрольных точек в стенах Checkpoint numbers in walls	Величина призмочной прочности, Rb (МПа) Prismatic strength value, Rb (MPa)	Величина модуля упругости, Eb (МПа) Elastic modulus value, Eb (MPa)	Размер высоты сечения, H (м) Cross-section height dimension, H (m)	Размер рабочей высоты сечения, h ₀ (м) Dimension of the working height of the cross-section, h ₀ (m)
1	23,05	28030	3,61	3,46
2	28,2	30600	3,61	3,46
3	21,75	27380	3,18	3,03
4	23,55	28270	3,18	3,03
5	26,5	29650	2,68	2,53

Таблица 2. Расчетные значения напряжений в арматуре и бетоне низовых подпорных стен водоприемника ГАЭС

Table 2. Design values of stresses in reinforcement and concrete of the lower retaining walls of the PSPP water intake

Номера контрольных точек <i>Checkpoint numbers in walls</i>	Напряжения σ_c , МПа в сжатой арматуре <i>Stresses σ_c, MPa in compressed reinforcement</i>	Напряжения σ_s , МПа в растянутой арматуре <i>Stresses σ_s, MPa in tension reinforcement</i>	Напряжения σ_b , МПа в сжатом бетоне <i>Stresses σ_b, MPa in compressed concrete</i>
1	-90,2	217,6	-14,6
2	-120,9	291,7	-21,3
3	-60,1	143,5	-9,7
4	-100,6	173,6	-19,1
5	-58,6	178,9	-11,6

Выводы

1. В целях определения напряженного состояния в горизонтальных сечениях подпорных стен, выполненных из железобетона, была предложена инженерная методика расчета.

2. Разработанная методика была практически использована при расчетах напряжений в арматуре и бетоне по горизонтальным сечениям низовых подпорных стен водоприемника ГАЭС с учетом данных инструментальных обследований лицевой арматуры методом разгрузки арматуры.

3. Результаты произведенных расчетов показали, что растягивающие напряжения в тыловой арматуре подпорных стен, составившие 291,7 МПа, практически достигли значения предела текучести, равного 300 МПа, для арматуры класса А-II.

4. Возникает необходимость регулярного контроля величин напряжений в низовых подпорных стенах водоприемника ГАЭС. Может потребоваться усиление данных подпорных стен при дальнейшем росте напряжений в рабочей тыловой арматуре.

Список использованных источников

1. Волосухин В.А., Дыба В.П., Евтушенко С.И. Расчет и проектирование подпорных стен гидротехнических сооружений: учебное пособие. М.: Изд-во АСВ, 2015. 96 с.
2. Волосухин В.А., Воропаев В.И., Яицкий Л.В. Расчет подпорных стен гидротехнических сооружений: учебное пособие. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2005. 108 с.
3. Серебрянников Н.И., Гидроаккумулирующие электростанции. Строительство и эксплуатация Загорской ГАЭС / Родионов В.Г., Кулешов А.П., Магрук В.И., Иванущенко В.С. М.: НЦ ЭНАС, 2000. 355 с.
4. Синюгин В.Ю., Магрук В.И., Родионов В.Г. Гидроаккумулирующие электростанции в современной электроэнергетике. М.: НЦ ЭНАС, 2008. 352 с.
5. Barbour E., Wilson I.A. and Radcliffe J. A review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets, Renewable Sustainable Energy Rev. 2016. Vol. 61. Pp. 421-432. DOI: 10.1016/j.rser.2016.04.019.
6. Antal B.A. Pumped storage hydropower: a technical review, Master's Report, Boulder: Univ. of Colorado, 2014. P. 84. DOI: 10.1002/9783527673872.ch29.
7. Tàczi I. Pumped Storage Hydroelectric Power Plants: Issues and Applications, Budapest, Hungary: Energy Regulators Regional Association, 2016. P. 11. DOI: 10.1051/e3sconf/201913901009.
8. Лисичкин С.Е. Расчетные исследования устойчивости и прочности подпорных стен первого яруса водоприемника Загорской ГАЭС / Рубин О.Д., Атабиев И.Ж., Мельникова Н.И. // Гидротехническое строительство. 2012. № 2. С. 44-48.
9. Vinay B., Chauhan V.B., Dasaka S.M., Vinil K., Gade V.K. Investigation of failure of a rigid retaining wall

References

1. Volosukhin V.A., Dyba V.P., Yevtushenko S.I. Calculation and design of retaining walls of hydraulic structures. Tutorial. Moscow, ASV Publ., 2015. 96 p.
2. Volosukhin V.A., Voropaev V.I., Yaitskiy L.V. Calculation of retaining walls of hydrotechnical structures: textbook. Novocherkassk: YURSTU, 2005. 108 p. ISBN5-88998-494-2
3. Serebryannikov N.I. Pumped-storage power plants. Construction and operation of Zagorskaya PSPP / Rodionov V.G., Kuleshov A.P., Magruk V.I., Ivanushchenko V.S. Moscow: Izd. NC ENAS, 2000. 355 p.
4. Sinyugin V.Yu., Magruk V.I., Rodionov V.G. Pumped storage power plants in modern electric power industry. Moscow, NC ENAS Publ., 2008. 352 p.
5. Barbour E., Wilson I.A., and Radcliffe J., A review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets, Renewable Sustainable Energy Rev., 2016, vol. 61, P. 421-432. DOI: 10.1016/j.rser.2016.04.019.
6. Antal B.A., Pumped storage hydropower: a technical review, Master's Report, Boulder: Univ. of Colorado, 2014, p. 84. DOI:10.1002/9783527673872.ch29.
7. Tàczi I., Pumped Storage Hydroelectric Power Plants: Issues and Applications, Budapest, Hungary: Energy Regulators Regional Association, 2016, p. 11. DOI: 10.1051/e3sconf/201913901009.
8. Lisichkin S.E. Calculation studies of stability and strength of retaining walls of the first tier of the water receiver of the Zagorsk pumped storage power plant] / Rubin O.D., Atabiev I.Zh., Melnikova N.I. // Hydro technical construction. 2012, no. 2, P. 44-48.
9. Vinay B., Chauhan, Dasaka Murty, Vinil K. Gade. Investigation of failure of a rigid retaining wall

with relief shelves. The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2016. Pp. 2492-2497. DOI: 10.3208/jgssp.TC302-02.

10. **Abhishek S.V., Tarachand V., Satyanarayana Reddy C.N.V.** Case study of failure of retaining Wall at Dwarakanagar, Visakhapatnam. 48th Indian Geotechnical Conference. Indian Institute of Technology (IIT). Roorkee, India. 2013. Pp. 1-4. December 22-24.

11. **Chauhan V.B., Dasaka S.M., Gade V.K.** Investigation of failure of a rigid retaining wall with relief shelves // Japanese Geotechnical Society Special Publication. 2016. Pp. 2492-2497. DOI: 10.3208/jgssp.TC302-02.

12. **Sivakumar Babu G.L., Raghuveer Rao Palapati.** Forensic analysis of failure of retaining wall. The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2016. Pp. 2514-2519. DOI: 10.3208/jgssp.TC302-08.

13. **Lim A., Rahardjo P.P.** Lesson learned from retaining walls failures: a geotechnical disaster // Int. Conf. on disaster management. 2018 (ICDM 2018). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822903014>.

14. **Do T.N., Ou C.Y. and Chen R.P.** A study of failure mechanisms of deep excavation in soft clay using the finite element method, Computer and Geotechnics, 73:153-163, 2016. DOI: 10.1016/j.compgeo.2015.12.009.

15. О безопасности гидротехнических сооружений: Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 177-ФЗ (ред. от 1 января 2022 г.) // Собрание законодательства РФ. 2021. № 24, ст. 4188.

16. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003. Москва, 2012. 39 с.

17. СП 41.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87. Москва, 2012. 67 с.

18. СП 101.133320.2012. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.07-87. М.: Минрегион России, 2012. 79 с.

19. **Chen J., Li Z., Liang R., Jiang G. and Wu W.** Verification Analysis of the Relationship Between Soil Pressure and Displacement of Retaining Structure // Journal of Physics: Conference Series, 2152 (2020), 012014. Pp. 1-10. DOI: 10.1088/1742-6596/2152/1/012014.

20. **Khosravi H.M., Pipatpongsa T., Takemura J.** Experimental analysis of earth pressure against rigid retaining walls under translation mode. Geotechnique. 2013. № 63 (12). Pp. 1020-1028. DOI: 10.1680/GEOT.12.P.021.

21. **Mazni D.I., Hakam A., Tanjung J. and Ismail F.A.** Stability analysis of concrete block retaining wall based on a scaled laboratory. E3S Web of Conferences, 331, 05013 (2021). Pp. 1-4. DOI: 10.1051/e3sconf/202133105013.

22. **Sari U.C., Sholeh M.N., Hermanto I.** The stability analysis study of conventional retaining walls variation design in vertical slope., J. Phys. Conf. Ser., 1444, 1 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1444/1/012053.

23. **Mazni D.I.** An alternative model of retaining walls on the sandy area to prevent landslides, E3S Web of Conferences, 156 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202015602016.

24. **Nimbalkar S., Pain A., Ahmad S.M. and Chen Q.** Stability Assessment of Earth Retaining Structures under Static and Seismic Conditions, Infrastructures. 2019. № 4. P. 15. DOI:10.3390/infrastructures402001.

with relief shelves. The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2016. P. 2492-2497. DOI: 10.3208/jgssp.TC302-02.

10. **Abhishek S.V., Tarachand V., Satyanarayana Reddy C.N.V.** Case study of failure of retaining Wall at Dwarakanagar, Visakhapatnam / 48th Indian Geotechnical Conference. Indian Institute of Technology (IIT), December 22-24, 2013. Roorkee, India. pp. 1-4. ISBN: 978-81-925548-1-5, Paper No. 286

11. **Chauhan V.B., Dasaka S.M., Gade V.K.** Investigation of failure of a rigid retaining wall with relief shelves // Japanese Geotechnical Society Special Publication. 2016. Pp. 2492-2497. DOI: 10.3208/jgssp.TC302-02.

12. **G.L. Sivakumar Babu, Raghuveer Rao Palapati.** Forensic analysis of failure of retaining wall. The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (2016). Pp. 2514-2519. DOI: 10.3208/jgssp.TC302-08.

13. **A. Lim, P.P. Rahardjo,** "Lesson learned from retaining walls failures: a geotechnical disaster", Int. Conf. on disaster management, 2018 (ICDM 2018). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822903014>.

14. **T.N. Do, C.Y. Ou, and R.P. Chen,** "A study of failure mechanisms of deep excavation in soft clay using the finite element method", Computer and Geotechnics, 73:153-163, 2016. DOI: 10.1016/j.compgeo.2015.12.009.

15. Federal Law of 21.07.1997 No. 177-FZ (as amended on 01.01.2022) "On the safety of hydro technical structures" // Code of Laws of the Russian Federation. 2021. № 24. Art. 4188.

16. SP 58.13330.2012 "Hydraulic structures. Basic provisions" Updated edition of SNIP 33-01-2003. Moscow, 2012. 39 p.

17. SP 41.13330.2012 "Concrete and reinforced concrete structures of hydraulic structures". Updated edition of SNiP 2.06.08-87, Moscow, 2012. 67 p.

18. SP 101.133320.2012 "Retaining walls, navigable locks, fish passage and fish protection structures". Updated edition of SNiP 2.06.07-87. Moscow, Minregion Rossii Publ., 2012. 79 p.

19. **J. Chen, Z. Li, R. Liang, G. Jiang, and W. Wu,** "Verification Analysis of the Relationship Between Soil Pressure and Displacement of Retaining Structure", Journal of Physics: Conference Series, 2152 (2020), 012014, pp. 1-10. DOI:10.1088/1742-6596/2152/1/012014

20. **Khosravi H.M., Pipatpongsa T., Takemura J.,** "Experimental analysis of earth pressure against rigid retaining walls under translation mode. Geotechnique, 2013, 63(12), P. 1020-1028. DOI: 10.1680/GEOT.12.P.021

21. **D.I. Mazni, A. Hakam, J. Tanjung, and F.A. Ismail.** "Stability analysis of concrete block retaining wall based on a scaled laboratory", E3S Web of Conferences, 331, 05013 (2021), P. 1-4. DOI: 10.1051/e3sconf/202133105013.

22. **U.C. Sari, M.N. Sholeh, I. Hermanto,** "The stability analysis study of conventional retaining walls variation design in vertical slope", J. Phys. Conf. Ser., 1444, 1 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1444/1/012053.

23. **D.I. Mazni.** "An alternative model of retaining walls on the sandy area to prevent landslides, E3S Web of Conferences, 156 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202015602016.

24. **S. Nimbalkar, A. Pain, S.M. Ahmad, and Q. Chen.** "Stability Assessment of Earth Retaining Structures under Static and Seismic Conditions",

25. Li J., Wang M. Simplified method for calculating active earth pressure on rigid retaining walls considering the arching effect under translational mode // Int. J. Geotech. 2014. № 14. Pp. 282-290. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000313.

26. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Пашченко Ф.А. Разработка методики расчета напряженного состояния в горизонтальных сечениях гидротехнических подпорных стен уголкового типа // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15, № 5. С. 339-344.

27. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Pashchenko F.A. Results of experimental researches of reinforced concrete retaining walls // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2020. December. № 16 (2). Pp. 152-160. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-2-152-160.

Об авторах

Федор Александрович Пашченко, канд. техн. наук, генеральный директор, lenair@lenair.ru

Никита Сергеевич Харьков, канд. техн. наук, заместитель генерального директора по науке; kharkov_ns@lenair.ru

Нартмир Владимирович Ханов, д-р техн. наук, заведующий кафедрой гидротехнических сооружений. eLIBRARY SPIN-код: 4314-8184; khanov@rgau-msha.ru

Сергей Николаевич Редников, д-р техн. наук, доцент кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами. eLIBRARY SPIN-код: 6267-71900; rednikov@rgau-msha.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Пашченко Ф.А., Харьков Н.С., Ханов Н.В., Редников С.Н. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Criteria of authorship

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

Вклад авторов

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 09.01.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 13.03.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 13.03.2024

Infrastructures, 2019, 4, p. 15. DOI:10.3390/infrastructures402001.

25. J. Li, M. Wang, "Simplified method for calculating active earth pressure on rigid retaining walls considering the arching effect under translational mode", Int. J. Geotech. 2014, 14, P. 282-290. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000313.

26. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Pashchenko F.A. Development of methods for calculating the stress state in horizontal sections of hydro technical retaining walls of the angle type]. 2019. V. 15. № 5. P. 339-344.

27. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Pashchenko F.A. "Results of experimental researches of reinforced concrete retaining walls" / Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings, December 2020, 16(2), pp. 152-160 DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-2-152-160.

Author information

Fedor A. Pashchenko, CSc (Eng), General director lenair@lenair.ru

Nikita S. Kharkov, CSc (Eng), Deputy general director kharkov_ns@lenair.ru

Nartmir V. Khanov, DSc (Eng), Head of the department of hydraulic structures.

Sergey N. Rednikov, DSc (Eng), assistant professor of the department of hydraulics, hydrology and management of water resources. eLIBRARY SPIN-код: 6267-71900; rednikov@rgau-msha.ru

Pashchenko F.A., Kharkov N.S., Khanov N.V., Rednikov S.N. performed practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism.