

DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-1-82-91
УДК 626.01/69.04

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Экспериментальные исследования влияния характера нагрузок на напряженно-деформированное состояние подпорных стенок

Ф.А. Пащенко*АО «ПИИНИИ ВТ «Ленаэропроект»», Российская Федерация, 198095, Санкт-Петербург, наб. Обводного канала, д. 122, лит. Б lenair@lenair.ru*

История статьи

Поступила в редакцию: 16 октября 2020 г.
Доработана: 24 декабря 2020 г.
Принята к публикации: 14 января 2021 г.

Аннотация. *Актуальность.* Подпорные стенки являются распространенными сооружениями, входящими в состав гидроузлов. Им присущи характерные особенности гидротехнических сооружений, такие как значительные габариты, низкий процент армирования (до 1,0 %), горизонтальные межблочные швы, обуславливающие их характер работы и напряженно-деформированное состояние. Основные нагрузки на тыловые грани подпорных стенок – это нагрузки от действия грунта засыпок. При этом характер их воздействия может оказаться различным. Неполный учет конструктивных особенностей и характера действия нагрузок при проектировании целого ряда подпорных стенок, находящихся в стадии длительной эксплуатации, вызвал необходимость усиления подпорных стенок. Один из способов усиления заключался в установке стержневой арматуры в пробуренные наклонные отверстия, пересекающие строительные швы. Возникла необходимость изучения конструкций подпорных стенок при действии различных нагрузок, в том числе с учетом усиления наклонными стержнями. *Цель* экспериментальных исследований заключалась в изучении влияния переменной нагрузки на напряженно-деформированное состояние указанных конструкций, в том числе с учетом наклонной арматуры, установленной в зонах горизонтальных межблочных швов. При решении поставленных задач применялись проверенные экспериментальные *методы* исследований железобетонных конструкций гидротехнических сооружений. *Результаты.* Получены опытные данные исследования моделей подпорных стен, в том числе с усилением наклонной арматурой, при различном расположении равнодействующей нагрузки на тыловые грани моделей. Выполнено экспериментальное обоснование усиления железобетонных конструкций подпорных стенок наклонной арматурой, пересекающей горизонтальные строительные швы.

Ключевые слова: подпорные стенки гидроузлов, горизонтальные межблочные швы, характер действия нагрузок, напряженно-деформированное состояние, экспериментальные исследования

Для цитирования

Пащенко Ф.А. Экспериментальные исследования влияния характера нагрузок на напряженно-деформированное состояние подпорных стенок // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 1. С. 82–91. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-1-82-91>

Пащенко Федор Александрович, генеральный директор.

© Пащенко Ф.А., 2021

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

Experimental-theoretical studies of hydrotechnical angular-type retaining walls

Fedor A. Pashchenko

JSC "Lenaeroproect", 122B Obvodnogo Kanala Emb, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation
lenair@lenair.ru

Article history

Received: October 16, 2020

Revised: December 24, 2020

Accepted: January 14, 2021

For citation

Pashchenko F.A. Experimental-theoretical studies of hydrotechnical angular-type retaining walls. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(1):82–91. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-1-82-91>

Abstract. *Relevance.* Retaining walls are common structures that are part of waterworks. They have the characteristic features of hydraulic structures, such as large dimensions, low percentages of reinforcement (up to 1.0%), horizontal interblock joints. The listed features determine the nature of the work and the stress-strain state of the retaining walls. The main loads on the rear faces of the retaining walls are loads from the action of the backfill soil. The incomplete consideration of the design features and the nature of the loads action in the design of a number of retaining walls that are in the stage of long-term operation has caused the need to strengthen them. One of the reinforcement *methods* was to install reinforcement rods in drilled inclined holes in the zones of horizontal interblock joints. It was necessary to conduct experimental studies of reinforced concrete retaining walls under the action of various loads, in particular considering the reinforcement by inclined rods. The *aim of the experimental research* was to study the effect of variable load on the stress-strain state of these structures, among others with due regard to inclined reinforcement installed in the zones of horizontal interblock joints. When solving the set tasks, proven experimental methods of researching reinforced concrete structures of hydrotechnical structures were used. *Results.* Experimental data from the study of models of retaining walls, including those with reinforcement by inclined reinforcement, at different locations of the resultant load on rear faces of models were obtained. An experimental substantiation of the reinforcement of reinforced concrete structures of retaining walls with an inclined reinforcement crossing horizontal construction joints has been carried out.

Keywords: retaining walls of waterworks, horizontal interblock joints, the nature of the loads action, stress-strain state, experimental research

Введение

Подпорные стенки являются распространенными сооружениями, входящими в состав гидротехнических сооружений [1–7]. Им присущи характерные особенности гидротехнических сооружений, такие как значительные габариты, низкие проценты армирования (до 1,0 %), горизонтальные межблочные швы. Перечисленные особенности обуславливают характер работы и напряженно-деформированное состояние подпорных стен.

Основные нагрузки на тыловые грани подпорных стенок – это нагрузки от действия грунта насыпок. При этом характер их воздействия может оказаться различным.

Не полный учет конструктивных особенностей и характера действия нагрузок при проектировании целого ряда подпорных стенок, находящихся в стадии длительной эксплуатации, вызвал необходимость усиления подпорных стенок [8–16].

Одним из способов усиления заключался в установке стержней арматуры в пробуренные наклонные отверстия, пересекающие строительные швы.

Возникла необходимость изучения конструкций подпорных стенок при действии различных нагрузок, в том числе с учетом установки наклонных стержней.

Таким образом, цель экспериментальных исследований заключалась в изучении влияния переменной нагрузки на напряженно-деформированное состояние указанных конструкций, в том числе с учетом наклонной арматуры, установленной в зонах горизонтальных межблочных швов.

При проведении экспериментальных исследований был также использован зарубежный опыт проведения исследований напряженно-деформированного состояния подпорных стенок [17–25].

Материалы и методы

При решении поставленных задач применялись проверенные экспериментальные методы исследований железобетонных конструкций гидротехнических сооружений.

Экспериментальные исследования проводились на основе железобетонных моделей подпорных стенок, изготовленных в масштабе 1:12 низовых подпорных стенок водоприемника Загорской ГАЭС [8; 9; 14].

Основные габариты железобетонных моделей: высота 1,43 м, толщина 0,30 м, ширина в корневом сечении 0,33 м, ширина верха моделей 0,08 м. На высоте 0,14; 0,345; 0,708 м от корневого сечения устроены горизонтальные межблочные швы. Бетон моделей класса В25.

У тыловой грани установлены три стержня диаметром 12 мм класса А-III, у лицевой грани – один стержень диаметром 12 мм класса А-III.

Две модели М-1 и М-4 изготавливались без усиления, две модели М-2 и М-3 усиливались посредством наклонных хомутов $\varnothing 10$ мм класса А-III, размещенным по бокам модели под углом 15° к горизонтальному среднему шву.

На первой стадии исследований (этапы 1 и 2) моделей М-1 (без усиления) и М-2 (усиленной наклонными стержнями) равнодействующая нагрузки прикладывалась на расстоянии 0,82 м от корневого сечения.

На этапах 3 и 4 второй стадии исследований равнодействующая нагрузки прикладывалась к моделям М-3 и М-4 на расстоянии 0,645 м от корневого сечения.

Конструкции моделей М-1, М-2, М-3, М-4 и схемы их испытаний представлены на рис. 1.

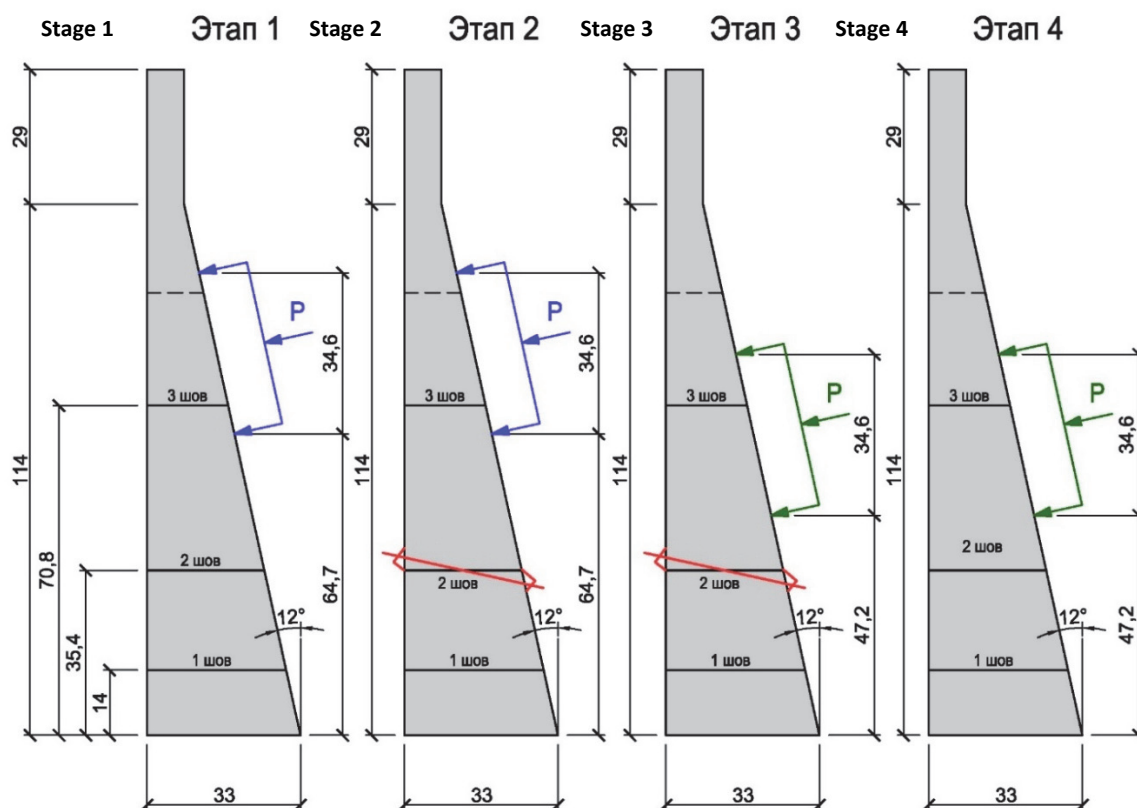


Рис. 1. Конструкции моделей М-1, М-2, М-3, М-4 и схемы их испытаний
[Figure 1. Designs of models M-1, M-2, M-3, M-4 and their test schemes]

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментальных исследований модели железобетонной подпорной стенки без усиления при расположении нагрузки на расстоянии 82,0 см от корневого сечения

На первом этапе проводились экспериментальные исследования модели подпорной стенки М-1 без усиления при расположении равнодействующей нагрузки на высоте 82,0 см от низа модели. Опытные данные сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний модели М-1 ($P = 62,4$ кН) при нагрузке на верхней отметке
[Table 1. Test results of the model M-1 ($P = 62,4$ kN) at the load at the top mark]

Раскрытие горизонтальных швов [Disclosure of the horizontal joints]:	
– верхний шов [upper joint]	ср. [average] 0,16 мм [mm]
– средний шов [middle joint]	ср. [average] 0,39 мм [mm]
– нижний шов [bottom joint]	ср. [average] 0,365 мм [mm]
Раскрытие наклонных трещин [The inclined cracks opening]	
	№ 3 – 0,5 мм [mm]
	№ 4 – 0,4 мм [mm]
	№ 6 – 0,8 мм [mm]
Перемещение верха модели [Displacement of the top of the model]	20,37 мм [mm]

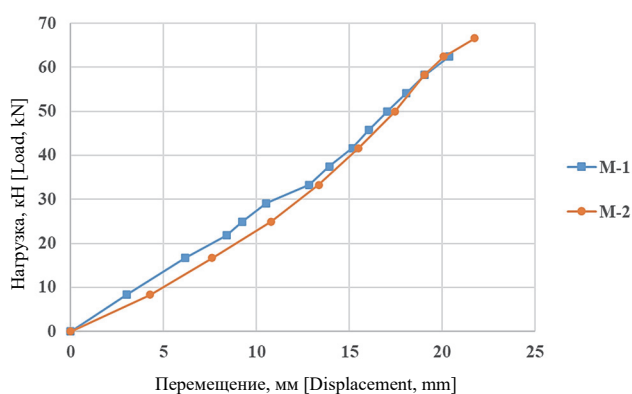


Рис. 2. Величина горизонтальных смещений
[Figure 2. The value of horizontal displacements]

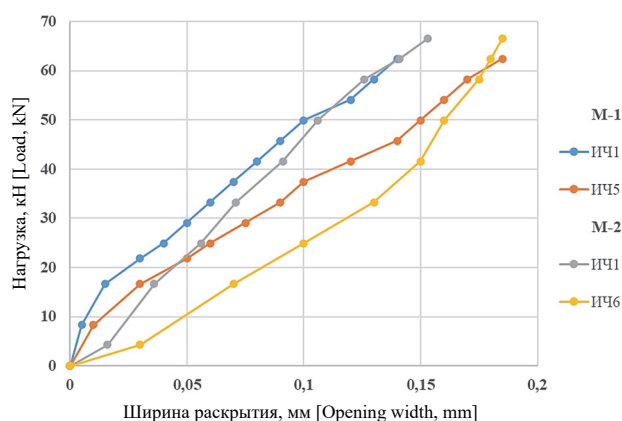


Рис. 3. Величина раскрытия верхнего шва
[Figure 3. The value of the upper joint opening]

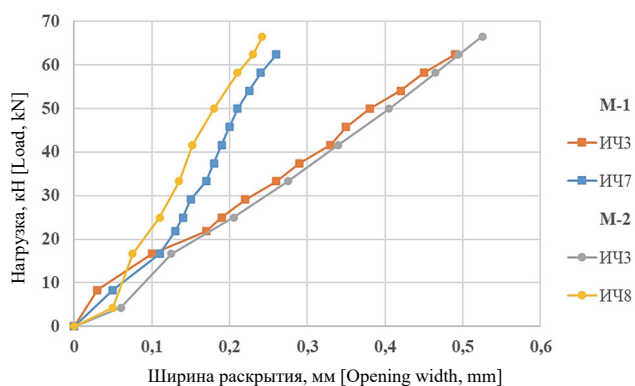


Рис. 4. Величина раскрытия среднего шва
[Figure 4. The value of the middle joint opening]

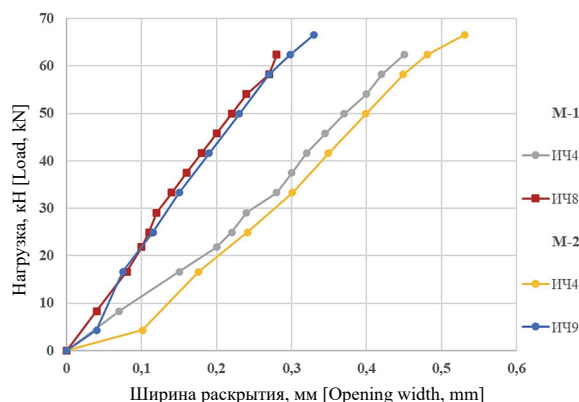


Рис. 5. Величина раскрытия нижнего шва
[Figure 5. The value of the lower joint opening]

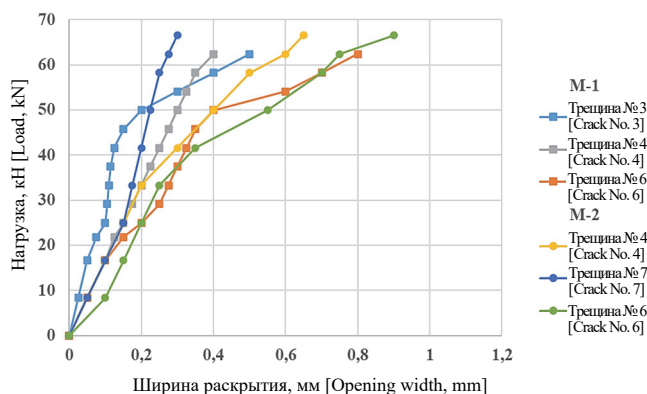


Рис. 6. Величина раскрытия наклонных трещин
[Figure 6. The value of the inclined cracks opening]

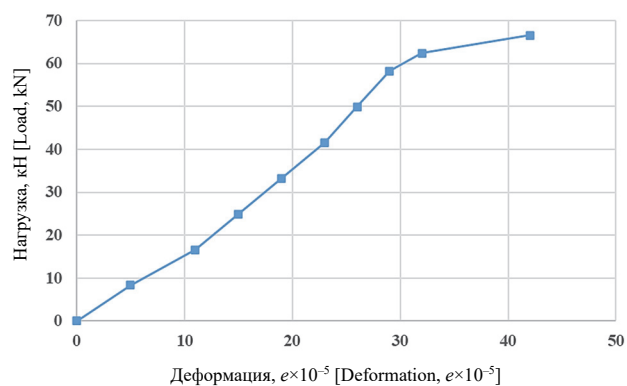


Рис. 7. Величина деформации наклонной арматуры модели М-2
[Figure 7. Deformation value of the model М-2 inclined reinforcement]

Наибольшая нагрузка на модель М-1 на первом этапе равнялась 62,4 кН. При этом перемещение верха модели составило 20,37 мм. Среднее значение ширины раскрытия верхнего, среднего и нижнего горизонтальных межблочных швов составило 0,16; 0,39; 0,365 мм соответственно. Ширина раскрытия наиболее существенных наклонных трещин № 3, 4, 6 составила 0,5; 0,4; 0,8 мм соответственно.

Опытные данные испытаний модели М-1 изображены в виде графиков (в сопоставлении с испытаниями модели М-2) на рис. 2–7.

Результаты экспериментальных исследований модели железобетонной подпорной стенки, усиленной наклонными стержнями, при расположении нагрузки на расстоянии 82,0 см от низа модели

На втором этапе изучалась конструкция модели М-2, в которой установлены два стержня Ø 10 мм класса А-III, размещенных по бокам модели под углом 15° к горизонтальному среднему шву при расположении нагрузки на расстоянии 82,0 см от корневого сечения. Опытные данные сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний модели М-2 (с усилением, $P = 66,56$ кН) при нагрузке на верхней отметке
[Table 2. Test results of the model М-2 (with amplification, $P = 66,56$ кН) at the load at the top mark]

Раскрытие горизонтальных швов [Disclosure of the horizontal joints]:	
– верхний шов [upper joint]	ср. [average] 0,17 мм [mm]
– средний шов [middle joint]	ср. [average] 0,39 мм [mm]
– нижний шов [bottom joint]	ср. [average] 0,43 мм [mm]
Раскрытие наклонных трещин [The inclined cracks opening]	
	№ 4 – 0,65 мм [mm]
	№ 6 – 0,90 мм [mm]
	№ 7 – 0,30 мм [mm]
Относительная деформация наклонных стержней [The relative deformation of the inclined rods]	$42,0 \times 10^{-5}$ е. о. д.
Перемещение верха модели [Displacement of the top of the model]	21,75 мм [mm]

Наибольшая нагрузка на модель М-2 на втором этапе равнялась 66,56 кН. При этом перемещение верха модели составило 21,75 мм. Среднее значение ширины раскрытия верхнего, среднего и нижнего горизонтальных межблочных швов составило 0,17; 0,39; 0,43 мм соответственно. Ширина раскрытия наиболее существенных наклонных трещин № 4, 6, 7 составила 0,65; 0,90; 0,3 мм соответственно.

Величина относительного растяжения в боковой наклонной арматуре составила $42,0 \times 10^{-5}$ при величине напряжений 84 МПа и усилий 9,49 кН.

Опытные данные испытаний модели М-2 изображены в виде графиков (в сопоставлении с испытаниями модели М-1) на рис. 2–7.

Сопоставление и анализ полученных опытных данных показали, что наличие стержней наклонной арматуры вызвало возрастание предельной нагрузки на 6,7 %, снижение горизонтальных смещений и величины раскрытия строительных швов и наклонных трещин.

Также при нагрузке 62,4 кН горизонтальные смещения снизились на 1,5 %, величина раскрытия среднего шва – на 5,2 %, нижнего шва – на 6,5 %, величина раскрытия наклонных трещин: № 4 – на 33,3 %; № 6 – на 6,3 %; № 7 – на 20,0 %.

Результаты экспериментальных исследований модели железобетонных подпорной стенки, усиленной наклонными стержнями, при расположении нагрузки на расстоянии 64,5 см от низа модели

В рамках третьего этапа проводились экспериментальные исследования модели подпорной стенки М-3 (усиленной наклонными стержнями), к которой равнодействующая нагрузки приложена на высоте 64,5 см от низа модели. Опытные данные сведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний модели М-3 (с усилением, $P = 83,2$ кН) при нагрузке на нижней отметке
 [Table 3. Test results of the model M-3 (with amplification, $P = 83,2$ kN) at the load at the bottom mark]

Раскрытие горизонтальных швов [Disclosure of the horizontal joints]:	
– верхний шов [upper joint]	ср. [average] 0,07 мм [mm]
– средний шов [middle joint]	ср. [average] 0,34 мм [mm]
– нижний шов [bottom joint]	ср. [average] 0,37 мм [mm]
Раскрытие наклонных трещин [The inclined cracks opening]	
	№ 3 – 0,43 мм [mm]
	№ 4 – 0,70 мм [mm]
	№ 6 – 0,63 мм [mm]
Относительная деформация наклонных стержней [The relative deformation of the inclined rods]	$72,0 \times 10^{-5}$ е.о.д.
Перемещение верха модели [Displacement of the top of the model]	18,24 мм [mm]

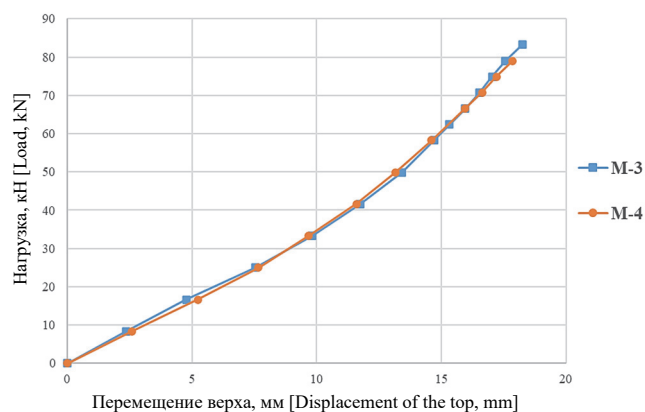


Рис. 8. Величина горизонтальных смещений
 [Figure 8. The horizontal displacements value]

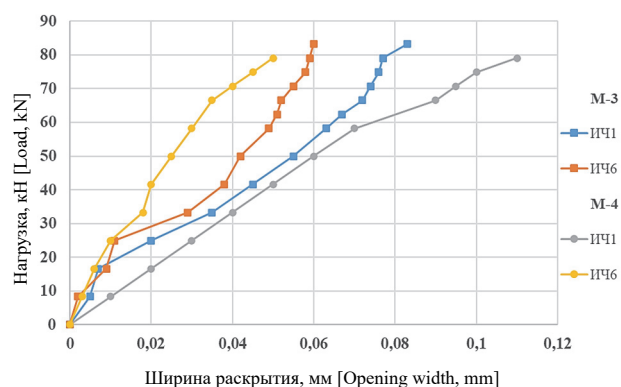


Рис. 9. Величина раскрытия верхнего шва
 [Figure 9. The value of the upper joint opening]

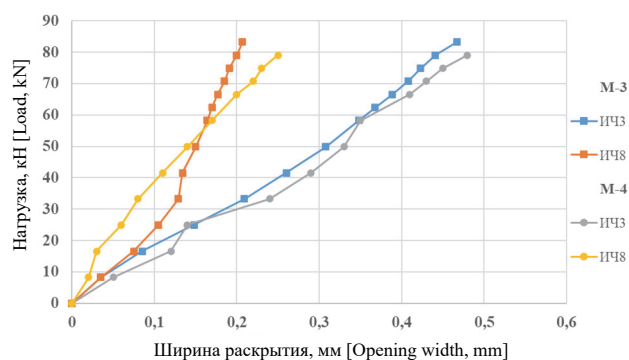


Рис. 10. Величина раскрытия среднего шва
 [Figure 10. The value of the middle joint opening]

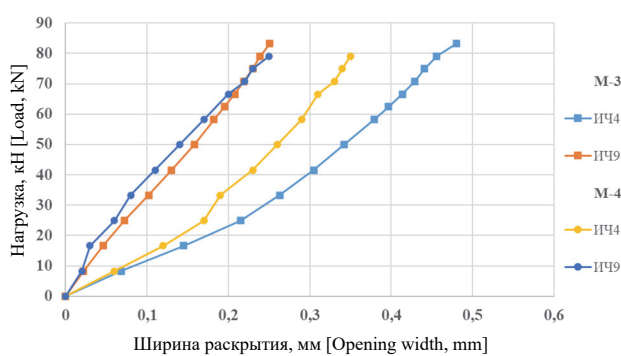


Рис. 11. Величина раскрытия нижнего шва
 [Figure 11. The value of the lower joint opening]

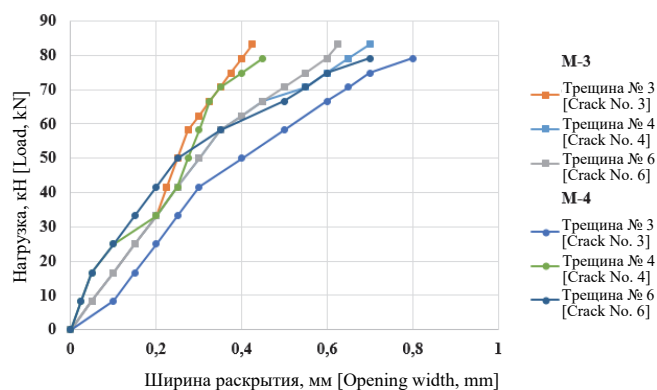


Рис. 12. Величина раскрытия наклонных трещин
[Figure 12. The value of the inclined cracks opening]

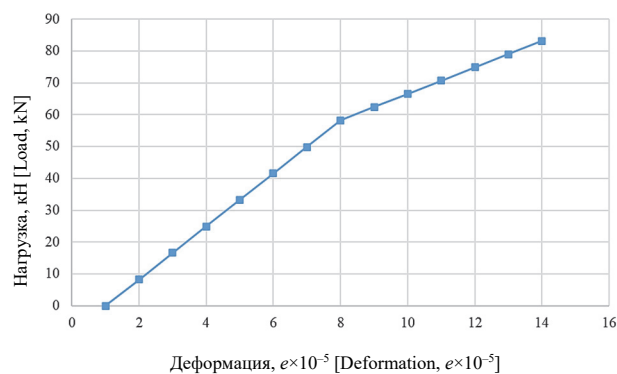


Рис. 13. Величина деформации наклонной арматуры модели М-3
[Figure 13. Deformation value of the model M-3 inclined reinforcement]

Наибольшая нагрузка на модель М-3 на третьем этапе равнялась 83,2 кН. При этом перемещение верха модели составило 18,24 мм. Среднее значение ширины раскрытия верхнего, среднего и нижнего горизонтальных межблочных швов составило 0,07; 0,34; 0,37 мм соответственно. Ширина раскрытия наиболее существенных наклонных трещин № 3, 4, 6 составила 0,43; 0,70; 0,63 мм соответственно.

Величина относительного растяжения в боковой наклонной арматуре составила $72,0 \times 10^{-5}$ при величине напряжений 144 МПа и усилий 16,27 кН.

Опытные данные испытаний модели М-3 изображены в виде графиков (в сопоставлении с испытаниями модели М-4) на рис. 8–13.

Результаты экспериментальных исследований модели железобетонной подпорной стенки без усиления при расположении нагрузки на расстоянии 64,5 см от низа модели

В рамках третьего этапа проводились экспериментальные исследования модели подпорной стенки М-4 без усиления, к которой равнодействующая нагрузки приложена на высоте 64,5 см от низа модели. Опытные данные сведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты испытаний модели М-4 ($P = 79,04$ кН) при нагрузке на нижней отметке
[Table 4. Test results of the model M-4 ($P = 79,04$ кН) at the load at the bottom mark]

Раскрытие горизонтальных швов [Disclosure of the horizontal joints]:	
– верхний шов [upper joint]	ср. [average] 0,085 мм [mm]
– средний шов [middle joint]	ср. [average] 0,37 мм [mm]
– нижний шов [bottom joint]	ср. [average] 0,30 мм [mm]
Раскрытие наклонных трещин [The inclined cracks opening]	
	№ 3 – 0,80 мм [mm]
	№ 4 – 0,45 мм [mm]
	№ 6 – 0,70 мм [mm]
	№ 7 – 0,65 мм [mm]
Перемещение верха модели [Displacement of the top of the model]	
	17,86 мм

Наибольшая нагрузка на модель М-4 на четвертом этапе равнялась 79,04 кН. При этом перемещение верха модели составило 17,86 мм. Среднее значение ширины раскрытия верхнего, среднего и нижнего горизонтальных межблочных швов составило 0,085; 0,37; 0,30 мм соответственно. Ширина раскрытия наиболее существенных наклонных трещин № 3, 4, 6 составила 0,8; 0,45; 0,70 мм соответственно.

Опытные данные испытаний модели М-2 изображены в виде графиков (в сопоставлении с испытаниями модели М-3) на рис. 8–12.

Сопоставление и анализ полученных опытных данных показали, что наличие стержней наклонной арматуры вызвало возрастание предельной нагрузки на 5,3 %, снижение горизонтальных смещений и величины раскрытия строительных швов и наклонных трещин.

Также при нагрузке 62,4 кН горизонтальные смещения снизились на 0,3 %, величина раскрытия среднего шва – на 11,1 %, нижнего шва – на 30,0 %, величина раскрытия наклонных трещин: № 4 – на 29,0 %; № 6 – на 8,5 %; № 7 – на 11,6 %.

Заключение

Установлено, что неполный учет конструктивных особенностей и характера действия нагрузок при проектировании целого ряда подпорных стенок, находящихся в стадии длительной эксплуатации, вызвал необходимость их усиления (в том числе вследствие недостаточного горизонтального армирования). При этом один из способов усиления заключался в установке стержней арматуры в пробуренные наклонные отверстия в зонах горизонтальных межблочных швов.

Для исследования влияния различного характера действующих нагрузок, а также влияния усиления конструкций подпорных стенок слабонаклонными арматурными стержнями в зонах горизонтальных межблочных швов были изготовлены железобетонные модели низовых подпорных стенок водоприемника Загорской ГАЭС в масштабе 1:12.

Были проведены экспериментальные исследования железобетонных моделей (без усиления и усиленных слабонаклонными арматурными стержнями), к которым равнодействующая нагрузки прикладывалась на расстояниях 0,57 и 0,45 высоты модели от корневого сечения.

Анализ полученных опытных данных показал, что при положении равнодействующей нагрузки на расстоянии 0,57 высоты модели М-2 от корневого сечения наличие стержней наклонной арматуры вызвало возрастание предельной нагрузки на 6,7 %, снижение горизонтальных смещений на 1,5 % и величины раскрытия строительных швов (в среднем на 5,85 %) и наклонных трещин (в среднем на 19,9 %).

А при положении равнодействующей нагрузки на расстоянии 0,45 высоты модели М-3 от корневого сечения наличие стержней наклонной арматуры вызвало возрастание предельной нагрузки на 5,3 %, снижение горизонтальных смещений на 0,3 % и величины раскрытия строительных швов (в среднем на 20,6 %) и наклонных трещин (в среднем на 16,4 %).

Таким образом, экспериментально обоснована целесообразность усиления железобетонных конструкций подпорных стенок наклонными стержнями в зоне среднего горизонтального межблочного шва.

Список литературы

1. Рассказов Л.Н., Бестужева А.С., Малаханов В.В. и др. Гидротехнические сооружения (речные): в 2 ч. Ч. 2. М.: ЛитРес, 2016. 538 с.
2. Волосухин В.А., Дыба В.П., Евтушенко С.И. Расчет и проектирование подпорных стен гидротехнических сооружений. М.: Издательство АСВ, 2015. 96 с.
3. Ксенофонтова Т.К., Нью Фудун. Железобетонные подпорные стены, выбор расстояния между контрфорсами // Проблемы развития мелиорации и водного хозяйства и пути их решения. Ч. III. Безопасность гидротехнических сооружений: сб. материалов Международной научно-практической конференции. М.: МГУП, 2011. С. 106–111.
4. Семенюк С.Д., Котов Ю.Н. Железобетонные подпорные стены // Вестник Белорусско-Российского университета. 2018. № 4 (61). С. 86–101.
5. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., 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 энергетических сооружений. 2013. Вып. 18. С. 38–50.
6. Лисичкин С.Е., Рубин О.Д., Атабиев И.Ж., Мельникова Н.И. Расчетные исследования устойчивости и прочности подпорных стен первого яруса водоприемника Загорской ГАЭС // Природообустройство. 2012. № 2. С. 44–48.
7. 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.
8. Серебрянников Н.И., Родионов В.Г., Кулешов А.П., Магрук В.И., Ивануценко В.С. Гидроаккумулирующие электростанции. Строительство и эксплуатация Загорской ГАЭС. М.: НЦ ЭНАС, 2000. 355 с.
9. Синюгин В.Ю., Магрук В.И., Родионов В.Г. Гидроаккумулирующие электростанции в современной электроэнергетике. М.: НЦ ЭНАС, 2008. 352 с.
10. Рубин О.Д., Ляпин О.Б., Ни В.Е. Усиление эксплуатируемых подпорных сооружений // Гидротехническое строительство. 1989. № 12. С. 42–45.
11. Щербина В.И., Рубин О.Д., Ни В.Е. Эксплуатация, оценка состояния и разработка мероприятий по повышению надежности шлюзов канала имени Москвы. М.: Информэнерго, 1989. 56 с. (Гидроэлектростанции. Вып. 7).
12. Рубин О.Д. Усиление стен шлюзов докового типа и контроль за эксплуатацией // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике (ПРЕДСО-90). СПб.: Энергоатомиздат, 1991. С. 73–75.

13. Рубин О.Д., Баклыков И.В., Антонов А.С., Лисичкин С.Е., Фролов К.Е. Инструментальные и расчетные исследования низовых подпорных стен Загорской ГАЭС // *Природообустройство*. 2019. № 2. С. 80–88.
14. Николаев В.Б., Гун С.Я., Лисичкин С.Е., Ляпин О.Б. Прочность железобетонных подпорных стенок // *Гидротехническое строительство*. 1988. № 10. С. 54–58.
15. Лисичкин С.Е., Ляпин О.Б. Поперечное армирование массивных конструкций энергетических сооружений // *Энергетическое строительство*. 1989. № 11. С. 40–43.
16. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Пащенко 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.
17. Kalateh-Ahapi K.M., Fahimi-Farzam M. Constructability optimal design of reinforced concrete retaining walls using a multi-objective genetic algorithm // *Structural Engineering and mechanics*. 2013. Vol. 47. No. 2. Pp. 227–245. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-2627-5>
18. Cauhan V.B., Dasaka S.M., Gade V.K. 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. <https://doi.org/10.3208/jgssp.TC302-02>
19. Garg K.G. Retaining wall with reinforced backfill – a case study // *Geotextiles and Geomembranes*. 1998. No. 16. Pp. 135–149. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(98\)00003-X](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(98)00003-X)
20. Ertugrul O.L., Trandafir A.C. Reduction of lateral earth forces acting on rigid non-yielding retaining walls by EPS geofoam inclusions // *J. Mater. Civil Eng.* 2011. No. 23 (12). Pp. 1711–1718. [https://doi.org/10.1061/\(Asce\)Mt.1943-5533.0000348](https://doi.org/10.1061/(Asce)Mt.1943-5533.0000348)
21. Abhishek S.V., Tarachand V., Satyanarayana Reddy C.N.V. Case study of failure of retaining wall at Dwarkanagar, Visakhapatnam // *Proceedings of the 48th Indian Geotechnical Conference*. 2013. Paper No. 286.
22. Chauhan V.B., Dasaka S.M. Behaviour of rigid retaining wall with relief shelves with cohesive backfill // *Jap. Geot. Society*. 2016. Pp. 103–110.
23. Evans E.P., Hughes B.P. Shrinkage and thermal cracking in a reinforced concrete retaining wall. ICE Publishing, 2016. Pp. 111–125.
24. Babu G.L.S., Raja P., Rao P.R. Forensic analysis of failure of retaining wall // *Jap. Geot. Society*. 2016. Pp. 2514–2519. <https://doi.org/10.3208/jgssp.TC302-08>
25. Hamderi M., Guler E., Raouf A. An Investigation on the Formation of Cracks at the Corner Turns of the Modular Block Earth Walls // *International Journal of Civil Engineering*. 2019. Vol. 17. Pp. 219–230. <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0216-5>

References

1. Rasskazov L.N., Bestuzheva A.S., Malakhanov V.V., et al. *Gidrotekhnicheskiye sooruzheniya (rechnyye) [Hydro-technical structures (river)]* (part 2). Moscow: LitRes Publ.; 2016. (In Russ.)
2. Volosuhin V.A., Dyba V.P., Evtushenko S.I. *Raschet i proyektirovaniye podpornykh sten gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Calculation and design of retaining walls of hydraulic structures]*. Moscow: ASV Publishing House; 2008. (In Russ.)
3. Ksenofontova T.K., Nyu Fudun. Zhelezobetonnye podpornye steny, vybor rasstoyaniya mezhdou kontrforsami [Reinforced concrete retaining walls, the choice of the distance between buttresses]. *Problemy razvitiya melioratsii i vodnogo hozyaistva i puti ih resheniya. Ch. III. Bezopasnostj gydrotekhnicheskikh sooruzheni: sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-practicheskoy konferentsii [Land Improvement and Water Conservation: Problems and Solutions. Part 3. Safety of Hydraulic Structures: collection of materials of the International scientific and practical conference]*. Moscow: MGUP Publ.; 2011. p. 106–111. (In Russ.)
4. Semenyuk S.D., Kotov Yu.N. Zhelezobetonnye podpornye steny [Reinforced concrete retaining walls]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta [Bulletin of the Belarusian-Russian University]*. 2018;4(61):86–101. (In Russ.)
5. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Nefedov A.V., et al. Raschetnyye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya podpornoy stenki pervogo yarusy LV-1 vodopriyemnika Zagorskoy GAES, v tom chisle s uchetom dannykh sinkhronnykh zamerov pri sutochnom izmenenii urovnya verkhnego akkumuliruyushchego basseyna [Computational studies of the stress-strain state of the retaining wall of the first tier LV-1 of the receiving water of the Zagorskaya PSPP, including taking into account the data of synchronous measurements with daily changes in the level of the upper storage pool]. *Bezopasnost' energeticheskikh sooruzheniy [Safety of the energy structures]*. 2013;18:38–50. (In Russ.)
6. Lisichkin S.E., Rubin O.D., Atabiev I.Zh., Melnikova N.I. Raschetnyye issledovaniya ustoychivosti i prochnosti podpornykh sten pervogo yarusy vodopriyemnika Zagorskoy GAES [Computational studies of the stability and strength of the retaining walls of the first tier of the receiving basin of the Zagorsk PSPP]. *Prirodoobustrojstvo*. 2012;2:44–48. (In Russ.)
7. Rubin O.D., Ponomarev D.I., Melnikova N.I. Raschetnyye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya podpornykh sten pervogo yarusy vodopriyemnika Zagorskoy GAES [Computational studies of the stress-strain state of the retaining walls of the first tier of the receiving water of the Zagorsk PSPP]. *Prirodoobustrojstvo*. 2011;5:51–55. (In Russ.)

8. Serebryannikov N.I., Rodionov V.G., Kuleshov A.P., Magruk V.I., Ivanushchenko V.S. *Gidroakkumuliruyushchiye elektrostantsii. Stroitel'stvo i ekspluatatsiya Zagorskoy GAES [Pumped storage power plants. Construction and operation of the Zagorskaya PSPP]*. Moscow: NTS ENAS Publ.; 2000. (In Russ.)
9. Sinyugin V.Yu., Magruk V.I., Rodionov V.G. *Gidroakkumuliruyushchiye elektrostantsii v sovremennoy elektroenergetike [Pumped storage power plants in the modern electric power industry]*. Moscow: NTS ENAS Publ.; 2008. (In Russ.)
10. Rubin O.D., Lyapin O.B., Ni V.Ye. Usileniye ekspluatiruyemykh podpornykh sooruzheniy [Strengthening of the operated retaining structures]. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]*. 1989;12:42–45. (In Russ.)
11. Shcherbina V.I., Rubin O.D., Ni V.Ye. Ekspluatatsiya, otsenka sostoyaniya i razrabotka meropriyatiy po povysheniyu nadezhnosti shlyuzov kanala im. Moskvyy [Operation, assessment of the condition and development of measures to improve the reliability of locks of the Moscow channel] (issue 7). Moscow: Informenergo Publ.; 1989. (In Russ.)
12. Rubin O.D. Usileniye sten shlyuzov dokovogo tipa i kontrol' za ekspluatatsiyey [Strengthening the walls of dock-type locks and control over operation]. *Materialy konferentsiy i soveshchaniy po gidrotekhnike (PREDSO-90) [Proceedings of conferences and meetings on hydraulic engineering (PEDSO-90)]*. Saint Petersburg: Energoatomizdat Publ.; 1991. p. 73–75. (In Russ.)
13. Rubin O.D., Baklykov I.V., Antonov A.S., Lisichkin S.Ye., Frolov K.Ye. Instrumental'nyye i raschetnyye issledovaniya nizovykh podpornykh sten Zagorskoy GAES [Instrumental and computational studies of the lower retaining walls of the Zagorskaya PSPP]. *Prirodoobustroystvo*. 2019;2:80–88. (In Russ.)
14. Nikolaev V.B., Gun S.Ya., Lisichkin S.E., Lyapin O.B. Prochnost' zhelezobetonnykh podpornykh stenok. [Strength of reinforced concrete retaining walls]. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]*. 1988;10:54–58. (In Russ.)
15. Lisichkin S.E., Lyapin O.B. Poperechnoye armirovaniye massivnykh konstruktsey energeticheskikh sooruzheniy [Transverse reinforcement of massive structures of power facilities]. *Energeticheskoye stroitel'stvo [Energy construction]*. 1989;11:40–43. (In Russ.)
16. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Pashchenko F.A. Development of the methods for calculating the stress state in horizontal sections of hydraulic engineering angular-type retaining walls. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019;15(5):339–344. (In Russ.)
17. Kalateh-Ahapi K.M., Fahimi-Farzam M. Constructability optimal design of reinforced concrete retaining walls using a multiobjective genetic algorithm. *Structural Engineering and mechanics*. 2013;47(2):227–245. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-2627-5>
18. Cauhan V.B., Dasaka S.M., Gade V.K. Investigation of failure of a rigid retaining wall with relief shelves. *The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2016:2492–2497. <https://doi.org/10.3208/jgssp.TC302-02>
19. Garg K.G. Retaining wall with reinforced backfill – a case study. *Geotextiles and Geomembranes*. 1998;16:135–149. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(98\)00003-X](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(98)00003-X)
20. Ertugrul O.L., Trandafir A.C. Reduction of lateral earth forces acting on rigid non-yielding retaining walls by EPS geofom inclusions. *J. Mater. Civil Eng.* 2011;23(12):1711–1718. [https://doi.org/10.1061/\(Asce\)Mt.1943-5533.0000348](https://doi.org/10.1061/(Asce)Mt.1943-5533.0000348)
21. Abhishek S.V., Tarachand V., Satyanarayana Reddy C.N.V. Case study of failure of retaining wall at Dwarkanagar, Visakhapatnam. *Proceeding of the 48th Indian Geotechnical Conference*. 2013. Paper No. 286.
22. Chauhan V.B., Dasaka S.M. Behaviour of rigid retaining wall with relief shelves with cohesive backfill. *Jap. Geot. Society*. 2016:103–110.
23. Evans E.P., Hughes B.P. Shrinkage and thermal cracking in a reinforced concrete retaining wall. ICE Publishing, 2016. p. 111–125.
24. Babu G.L.S., Raja P., Rao P.R. Forensic analysis of failure of retaining wall. *Jap. Geot. Society*. 2016:2514–2519. <https://doi.org/10.3208/jgssp.TC302-08>
25. Hamderi M., Guler E., Raouf A. An Investigation on the formation of cracks at the corner turns of the modular block earth walls. *International Journal of Civil Engineering*. 2019;17:219–230. <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0216-5>