

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ имени Б.Е. ВЕДЕНЕЕВА»

ИЗВЕСТИЯ ВНИИГ

им. Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

Издание основано в 1931 году

Том 309

Санкт-Петербург
2023

УДК 626/627 (06)
ISSN 0368-0738

Учредитель:
АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»



РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ СОВЕТ:

В.Б. Штильман (главный редактор), В.Б. Глаговский, Е.Н. Беллендир, Ю.С. Васильев, А.Г. Василевский, В.В. Елистратов, И.И. Загрядский, Т.В. Иванова, Д.А. Ивашинов, В.И. Климович, Г.Л. Козинец, Д.В. Козлов, В.С. Кузнецов, М.Р. Мишина, Р.Н. Орищук, А.Б. Пономарев, В.А. Прокофьев, С.В. Сольский, А.М. Юделевич

В сборнике научных трудов «Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» публикуются новые научные результаты в области гидротехнического, промышленного и гражданского строительства, водного хозяйства, оснований и фундаментов, подземных сооружений, гидравлики и инженерной гидрологии.

Сборник предназначен для специалистов в области инженерной геологии и гидрогеологии, механики грунтов, гидравлики, гидротехники, экологии, а также для студентов, аспирантов и преподавателей соответствующих дисциплин.

The collection of scientific papers «Proceedings of VNIIG» publishes new scientific results in the field of hydraulic, industrial and civil engineering, water industry, bases and foundations, underground structures, hydraulics and engineering hydrology.

The collection is intended for specialists in the field of engineering geology and groundwater hydrology, soil mechanics, hydraulics, hydraulic engineering, ecology, as well as for students, postgraduates and lecturers of the respective branches of study.

Сборник «Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» входит в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (Перечень ВАК) по следующим группам научных специальностей:

- 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения,
- 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения,
- 2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС-77-36233 от 15 мая 2009 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Подписной индекс издания в каталоге ООО «Урал-Пресс» – 60490.

E-mail: izvestia@vniig.ru

Научная статья
УДК 624.21.093

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРОЛЁТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Александр Павлович Кузьменко¹, Владимир Сергеевич Сабуров²

^{1, 2} Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (ФИЦ ИВТ), Новосибирск, Россия

¹ apkuzm@gmail.com

² saburov58@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена возможность использования аналитических моделей вертикальных колебаний многопролётных балок с целью оценки упругих характеристик пролётных строений мостовых сооружений. Приведены примеры сравнения динамических характеристик реальных пролётных строений мостов и аналитических моделей.

Ключевые слова: динамические характеристики, формы и частоты собственных колебаний, многопролётная балка, обратная спектральная задача

Для цитирования: Кузьменко А.П., Сабуров В.С. Аналитические модели вертикальных колебаний пролётных строений мостовых сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 309. С. 3–20.

Original article

ANALYTICAL MODELS OF VERTICAL OSCILLATIONS OF BRIDGE SPANS

Alexander P. Kuzmenko¹, Vladimir S. Saburov²

^{1, 2} Federal Research Center for Information and Computational Technologies (FRC ICT),
Novosibirsk, Russia

¹ apkuzm@gmail.com

² saburov58@yandex.ru

Abstract. The possibility of using analytical models of vertical vibrations of multi-span beams in order to assess the elastic characteristics of the span structures of bridge structures is considered. Examples of comparison of dynamic characteristics of real bridge spans and analytical models are given.

Keywords: dynamic characteristics, forms and frequencies of natural oscillations, multi-span beam, inverse spectral problem

For citation: Kuzmenko A.P., Saburov V.S. Analytical models of vertical oscillations of bridge spans. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;309:3-20. (In Russ.).

Введение

Одной из задач проведения динамических испытаний мостов является определение спектров (рядов) частот и форм собственных колебаний

пролётных строений, что теоретически позволяет в результате решения обратной спектральной задачи определить значения жёсткости поперечных сечений отдельных пролётных строений простому изгибу, а также условия сопряжения пролётов с опорами (условия опирания).

Мостовые сооружения в статических и динамических расчётах на вертикальные нагрузки принято рассматривать как многопролётную балку на опорах, поэтому полное решение обратной спектральной задачи в рамках модели изгибных колебаний N -пролётной балки предусматривает определение следующих параметров:

жёсткости поперечного сечения простому изгибу отдельных пролётов $(EI)_{j=1,2,\dots,N}$, где j – номер пролёта;

жёсткости относительно угловых $K_{\varphi,i=0,1,\dots,N}$ и поперечных $K_{Sh,i=0,1,\dots,N}$ перемещений пролётов в опорных сечениях, где i – номер опоры.

Учитывая, что колебания балки могут происходить при действии осевой силы, а также балка может лежать на упругом полупространстве (например, балка жёсткости, подвешенная на вантах), полное количество неизвестных параметров модели без учёта инерции поворота поперечного сечения составляет $n = N + 2(N + 1) + 2 = 3N + 4$. Согласно теореме о единственности решения обратной спектральной задачи [1], количество измеренных частот собственных колебаний должно быть как минимум равным количеству неизвестных параметров модели. Например, в случае четырёхпролётной балки количество измеренных частот собственных колебаний должно составлять в зависимости от конструкции моста от 14 до 16. При этом значения собственных частот должны быть определены практически с абсолютной точностью. Так, при увеличении количества неизвестных параметров модели область существования решения частотного уравнения в параметрической области стремится к нулю.

Нахождение решения обратной спектральной задачи осложняется следующими факторами:

значения собственных колебаний пролётных строений измеряются с некоторой ошибкой;

количество измеренных частот собственных колебаний пролётных строений зависит от конструктивного исполнения мостового сооружения и может быть как больше, так и меньше количества неизвестных параметров модели.

В случае, когда количество измеренных частот собственных колебаний пролётных строений превышает количество неизвестных параметров модели, решение обратной спектральной задачи теоретически может быть найдено в полном объёме способом аппроксимации спектра собственных частот колебаний пролётных строений спектром собственных колебаний модели. Наиболее простой способ решения обратной спектральной задачи основан на сравнении спектров частот и форм собственных колебаний обследуемого моста и модели при различных значениях параметров модели. Достижение наилучшего совпадения спектров частот и форм собственных колебаний модели и моста производится в результате вариации неизвестных параметров модели способом градиентного спуска.

Определение безразмерных частот и форм собственных колебаний модели осуществляется в результате решения прямой спектральной задачи.

При проведении обследований мостов решение прямой спектральной задачи по определению частот и форм собственных колебаний многопролётной балки с различными условиями сопряжения в опорных сечениях осуществлялось согласно [2], когда граничные условия сопряжения балок отдельных пролётов с опорами задаются согласно условиям соответствия Тимошенко С.П.

Обратная спектральная задача считалась решённой, когда ошибка аппроксимации спектра собственных колебаний пролётных строений достигала минимума, разность частот собственных колебаний модели и пролётного строения не превышала ошибку измерений частот собственных колебаний, а эпюры форм собственных колебаний модели и пролётных строений подобны. Очевидно, что точность определения параметров модели зависит от точности измерения собственных частот пролётных строений моста, поэтому в некоторых случаях часть параметров модели из-за недостаточной точности измерения частот может не иметь практического значения.

В случае, когда количество измеренных частот собственных колебаний пролётных строений равно или меньше количества неизвестных параметров модели, решение обратной спектральной задачи находилось в рамках усечённых моделей, количество неизвестных (переменных) параметров которых меньше количества измеренных частот собственных колебаний пролётных строений. Данное условие обеспечивает единственность решения обратной спектральной задачи в рамках выбранной модели. Далее, усечённой моделью колебаний пролётных строений моста называется модель колебаний многопролётной балки, часть или все граничные условия сопряжения пролётов с опорами которой принимаются наперёд заданными фиксированными значениями. В зависимости от количества переменных параметров n модели, модель далее называется n -параметрической. Свобода выбора назначения части параметров модели наперёд заданным значениям определяет, что решение обратной спектральной задачи может быть найдено в рамках нескольких моделей. Выбор определённой модели из ряда возможных определяет не только корректность и точность получаемых значений параметров, но технологичность использования модели при организации оперативного мониторинга технического состояния мостовых сооружений.

Задание отдельных фиксированных параметров модели производится согласно конструктивному исполнению моста или на основании результатов ранее обследованных аналогичных мостов. Например, для мостов с неразрезным пролётным строением жёсткость поперечного сечения отдельных пролётов принимается одинаковой, погонная масса – постоянной, сопряжение пролётных строений с опорами – шарнирным.

Можно отметить следующее свойство моделей: все модели имеют одну и ту же наименьшую безразмерную частоту колебаний, поэтому в рамках простейшей модели колебаний одномассового осциллятора характеризуются фиксированными значениями сосредоточенной массы и жёсткости пружины. Эквивалентное значение жёсткости пружины одномассового осциллятора в данном случае определяется как жёсткостью отдельных элементов моста, так и условиями сопряжения между собой отдельных элементов. Поэтому задание фиксированных коэффициентов жёсткости опирания пролётных строений в некоторых опорных сечениях будет приводить к увеличению или уменьшению коэффициентов жёсткости опирания пролётных

строений в других опорных сечениях, а также к увеличению или уменьшению жёсткости поперечного сечения пролётных строений.

Целью проведённых исследований было установление возможности практического использования результатов, полученных при динамических испытаниях мостов под воздействием микросейсмического фона инженерно-сейсмометрическим методом, при оценке технического состояния мостовых сооружений.

Обследования мостовых сооружений включали:

измерение резонансных частот поперечных (вертикальных) колебаний и построение эпюр вертикальных смещений пролётных строений на резонансных частотах;

идентификацию частот форм собственных вертикальных колебаний в рамках выбранной модели;

решение обратной спектральной задачи по оценке жёсткости поперечного сечения пролётных строений простому изгибу и условий сопряжения пролётов с опорами и устоями в рамках простых усечённых моделей.

Необходимость проведения идентификации частот собственных колебаний определяется тем, что колебания пролётных строений происходят не только на частотах собственных колебаний, но также регистрируются резонансные колебания отдельных частей и конструкций (локальные резонансы).

В результате проведённых обследований было установлено, что соотношение между количеством зарегистрированных собственных колебаний и количеством локальных резонансов в диапазоне частот собственных колебаний напрямую связано с техническим состоянием мостового сооружения.

Идентификация частот форм собственных колебаний пролётных строений проводилась в рамках либо модели колебаний, шарнирно опёртой на неподвижные опоры прямолинейной многопролётной балки постоянной жёсткости и равномерно распределённой массы, либо модели колебаний прямолинейной многопролётной балки, жёстко закреплённой относительно угловых перемещений на крайних опорах (устаях) и шарнирно опёртой на промежуточных опорах.

В случае, когда рассматривается модель колебаний однопролётной балки, существует простое правило определения номера формы собственных колебаний [3]. В случае многопролётной балки правил идентификации форм и частот собственных колебаний нет. Как известно [4], в отличие от однопролётных балок, обладающих только одной основной частотой поперечных колебаний (одной первой гармоникой, одной второй гармоникой и т. д.), многопролётные балки имеют группу (зону) основных частот поперечных колебаний, группу первых гармоник, группу вторых гармоник и т. д.

Число частот поперечных колебаний в группе многопролётной балки равно числу пролётов балки. Самая низкая частота в группе частот называется наименьшей, самая высокая – наивысшей частотой. В каждой группе частот разность между соседними частотами меньше, чем между последней частотой одной группы и первой частотой следующей группы.

Установление соответствия измеренных эпюр форм системы пролётных строений (балки жёсткости) моста на резонансных частотах колебаний эпюрам форм собственных колебаний модели осуществлялось сравнением эпюр форм смещения пролётных строений с эпюрами форм собственных колебаний модели (процедура идентификации форм). В качестве критерия

совпадения эпюр форм использовалось значение среднеквадратичного отклонения ординат эпюр форм смещений собственных колебаний модели и пролётных строений.

При измерениях значений собственных частот колебаний пролётных строений под воздействием микросейсмического фона учитывалось, что амплитуда колебаний пролётных строений мостовых сооружений под воздействием микросейсмического фона, как правило, соответствует диапазону малых амплитуд, когда рассеивание колебательной энергии определяется силами конструкционного и сухого трения. Поэтому измеренные значения частот собственных колебаний соответствуют значениям собственных колебаний пролётных строений без смещения, которое в случае действия сил упруго-вязкого трения определяется значением логарифмического декремента затухания [5].

Предварительная оперативная оценка среднего значения жёсткости поперечного сечения и условий опирания на опоры пролётных строений (решение обратной спектральной задачи) осуществлялась в рамках усечённых рабочих моделей с помощью стандартного приложения Excel операционной системы Windows.

В качестве усечённых рабочих моделей вертикальных колебаний пролётных строений моста использовались модели изгибных поперечных колебаний многопролётной прямолинейной балки с постоянной погонной массой и жёсткостью поперечного сечения простому изгибу, в опорных сечениях упруго опёртой относительно угловых и жёстко относительно поперечных (вертикальных) перемещений [6].

В общем виде частоты собственных форм изгибных поперечных колебаний как однопролётной, так и многопролётной балки постоянного сечения и погонной массы без учёта отпорности упругого основания, осевой силы и инерции поворота сечения определяются выражением [2, 3]:

$$p_j = \frac{1}{2\pi} \sqrt{a_n \lambda_{n,j}^4}, \text{ Гц}, \quad (1)$$

где $a_n = \frac{EI}{L_n^4 m}$; EI , m , L_n – жёсткость поперечного сечения балки простому изгибу, погонная масса и длина n -го пролёта соответственно; $j = N(k1 - 1) + k2$ – сквозной индекс номера частот (форм) собственных колебаний; N – количество пролётов; $k1$ – номер группы (зоны); $k2$ – номер частоты в группе (зоне); $\lambda_{Ln,k1,k2} = \lambda_{n,j}$ – характеристическое число (решение частотного уравнения), приведённое к длине пролёта L_n .

По степени влияния на значения собственных частот колебаний многопролётной балки выделяются следующие параметры:

жёсткость поперечного сечения пролётов простому изгибу, $(EI)_{j=1,\dots,N}$;

коэффициенты жёсткости угловым и поперечным перемещениям

балки в опорных сечениях, $\mu_{i=0,\dots,N} = \frac{\mu_i}{\lambda_{1,1}} = \frac{K_{\varphi,i} L_1}{(EI)_1 \lambda_{1,1}}$, $\eta_{i=0,\dots,N} = \frac{K_{sh,i} L_1^3}{(EI)_1}$ (приведены выражения относительно характеристик первого пролёта), где $K_{\varphi,i}$, $K_{sh,i}$ – жёсткость в узлах сопряжения пролётного строения с опорами относительно угловых и вертикальных перемещений соответственно;

значение осевой силы, отпорности упругого основания и инерции поворота поперечного сечения для пролётных строений вантовых сооружений.

В исследованиях рассмотрены результаты инженерно-сейсмометрических обследований четырёх мостовых сооружений:

моста рамно-балочной конструкции с тремя опорами в виде Т-образных рам и четырьмя разрезными подвесными пролётными строениями;

двух мостов с цельнометаллическими (стальными) неразрезными пролётными строениями с ортотропной плитой проезжей части, шарнирно опертыми на устои и промежуточные опоры;

вантовой части моста, которая представляет собой неразрезную балку жёсткости, поддерживаемую в больших пролётах двумя плоскостями вант из стальных канатов.

В результате динамических испытаний мостовых сооружений согласно положениям инженерно-сейсмометрического метода неразрушающего контроля [7, 8] с помощью программ «Геотон-А» и «Геотон-Т» [9, 10] осуществлялось измерение значений собственных частот и построение эпюр форм собственных вертикальных колебаний пролётных строений.

1. Автодорожный мост через р. Иню, г. Новосибирск. Мост рамно-балочной конструкции с тремя опорами в виде Т-образных рам и четырьмя разрезными подвесными пролётными строениями из преднапряженных железобетонных балок таврового сечения, соединенных в ортотропную плиту проезжей части и шарнирно опертых на консоли рам и береговые устои. В продольном направлении разрезное четырёхпролётное строение моста организовано по схеме $33,5 + 2 \times 42 + 33,5$ м.

Карта амплитудного спектра передаточной функции [7, 8] профиля наблюдения, проходящего вдоль продольной оси (центральный профиль) моста, и результаты построения эпюр форм вертикальных смещений четырёхпролётного строения моста с учётом фазового спектра передаточной функции приведены на рис. 1.

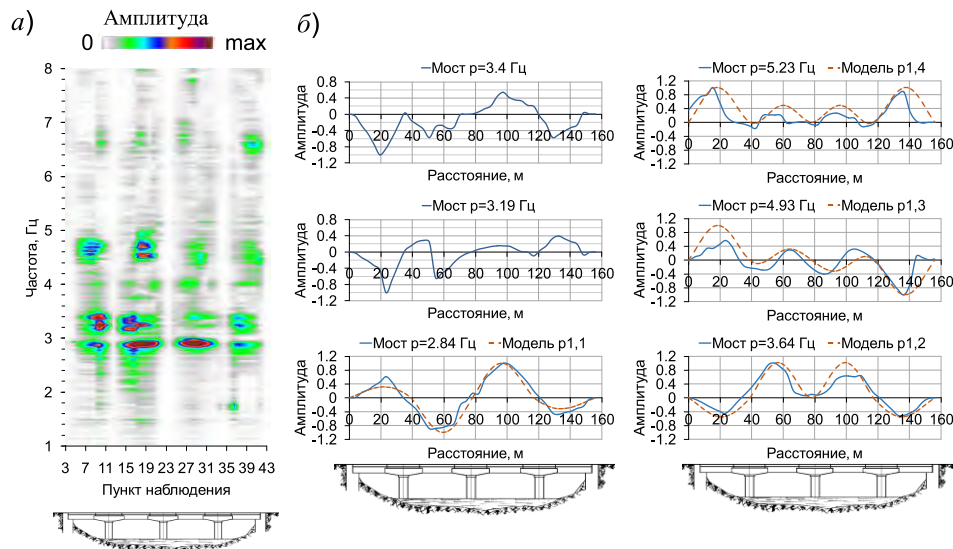


Рис. 1. Четырёхпролётный мост через р. Иню:

a – карта амплитудного спектра передаточной функции; *б* – спектр эпюр форм вертикальных смещений на резонансных частотах колебаний разрезного четырёхпролётного строения моста и модели (собственные колебания и локальные резонансы)

Идентификация эпюр форм смещений разрезного четырёхпролётного строения моста на резонансных частотах колебаний производилась в рамках модели изгибных колебаний четырёхпролётной балки, в опорных сечениях жёстко закреплённой относительно поперечных и свободно относительно угловых перемещений (предварительная модель).

В результате проведённого анализа эпюр вертикальных смещений четырёхпролётного строения были определены четыре частоты вертикальных резонансных колебаний, эпюры смещений пролётных строений на данных частотах соответствуют эпюрам собственных колебаний предварительной модели. Также было установлено, что количество локальных резонансов зависит от расположения профиля наблюдения (верховой, центральный, низовой) и изменяется от двух до шести в полосе частот первой группы собственных колебаний, что объясняется аварийным состоянием моста на момент обследования. Предварительная оценка среднего значения жёсткости поперечного сечения пролётных строений простому изгибу и среднего значения жёсткости угловым перемещениям в узлах сопряжения пролётных строений с опорами проведена в рамках модели изгибных поперечных колебаний четырёхпролётной балки, в опорных сечениях жёстко закреплённой относительно поперечных и упруго относительно угловых перемещений (рабочая двухпараметрическая модель).

При вариации коэффициентов жёсткости угловым перемещениям в опорных сечениях $\mu_{0\div 4}$ минимальное различие частот собственных колебаний модели от частот пролётных строений достигается при $\mu_{0\div 4} = 2,5$ и не превышает заданной ошибки измерения частот вертикальных колебаний пролётных строений (3 %). Параметры предварительной и усечённой рабочей моделей, а также частоты собственных колебаний пролётных строений моста приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры предварительной и усечённой рабочей моделей, мост через р. Иню (λ_j определены относительно длины первого пролёта, $L_1 = 42$ м)

Предварительная модель, $\mu_{0\div 4} = 0$		Усечённая рабочая модель, $\mu_{0\div 4} = 2,5$		Пролётное строение мостового сооружения	
λ_j	$\tilde{p}_j = \frac{\lambda_j^2}{\lambda_1^2}$	λ_j	$\tilde{p}_j = \frac{\lambda_j^2}{\lambda_1^2}$	$\tilde{p}_j = \frac{p_j}{p_1}$	p_j , Гц
2,6963	1,0	2,96860	1,0	1,0	2,84
3,1363	1,3530	3,36637	1,28594	1,282	3,64
3,6375	1,8200	3,90110	1,72691	1,736	4,93
3,8475	2,0362	4,00404	1,81925	1,842	5,23

В рамках рабочей модели параметры четырёхпролётного разрезного строения равны:

$$EI = \frac{4\pi^2 p_1^2 m L_1^4}{\lambda_{L1,1}^4} \approx 2,3 \cdot 10^7 \text{ тс} \cdot \text{м}^2 \text{ и } K_{\varphi,0\div 4} = \frac{\mu_{0\div 4} EI}{L_1} \approx 1,37 \cdot 10^6 \text{ тс} \cdot \text{м}, \quad (2)$$

где $p_1 = p_{1,1} \approx 2,84$ Гц – частота первой формы первой группы; $\lambda_{L1,1} = 2,96860$ – первый корень частотного уравнения; $\mu_{0\div 4} = 2,5$ – коэффициент жёсткости в опорных сечениях угловым перемещениям;

$L_1 = 42$ м – длина первого пролёта; $m = 1,8$ тс·с²/м² – погонная масса разрезного четырёхпролётного строения.

Согласно (2), значение жёсткости поперечного сечения четырёхпролётного разрезного строения простому изгибу в рамках предварительной модели больше в 1,47 раза, чем в рамках усечённой рабочей модели.

Как видно, мост рамно-балочной конструкции с тремя опорами в виде Т-образных рам и четырьмя разрезными подвесными пролётными строениями хорошо моделируется посредством усеченной рабочей модели колебаний четырёхпролётной балки.

2. Автодорожный мост через р. Туру, г. Тюмень. Мост выполнен в виде балочной неразрезной системы с ездой поверху. Под каждое направление движения транспорта предусмотрены отдельные пролётные строения (верховая и низовая плотки), которые представляют собой сталежелезобетонные неразрезные балочные системы с ортотропной плитой проезжей части. В продольном направлении, неразрезное четырёхпролётное строение верховой плотки моста организовано по схеме 63 + 84 + 126 + 84 м.

Карта амплитудного спектра передаточной функции и результаты построения эпюр форм вертикальных смещений с учётом фазового спектра передаточной функции на частотах резонансных вертикальных колебаний пролётного строения приведены на рис. 2.

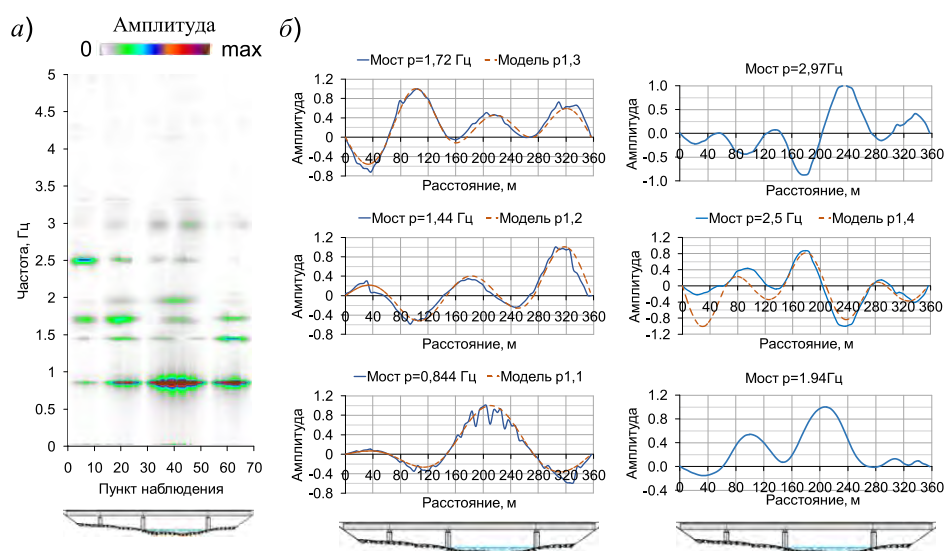


Рис. 2. Четырёхпролётный мост через р. Туру:
 а – карта амплитудного спектра передаточной функции; б – спектр эпюр форм вертикальных смещений на резонансных частотах колебаний неразрезного четырёхпролётного строения моста и модели (собственные колебания и локальные резонансы)

Идентификация эпюр форм вертикальных смещений неразрезного четырёхпролётного строения на резонансных частотах колебаний производилась в рамках предварительной модели изгибных колебаний четырёхпролётной балки, жёстко закреплённой относительно поперечных и свободно относительно угловых перемещений (предварительная модель). На амплитудном спектре передаточной функции регистрируются не менее ше-

сти ярко выраженных по амплитуде спектральных пиков, соответствующих резонансным колебаниям, но только эпюры смещений на четырёх собственных частотах вертикальных колебаний $p_{11} = 0,844$ Гц, $p_{12} = 1,44$ Гц, $p_{13} = 1,72$ Гц и $p_{14} = 2,5$ Гц соответствуют эпюрам собственных форм модели. При этом эпюра четвёртой формы собственных колебаний имеет заметные отличия от эпюры четвёртой формы модели, что является признаком минимальной достоверности идентификации данной частоты.

Предварительная оценка среднего значения жёсткости поперечного сечения пролётных строений простому изгибу и среднего значения жёсткости угловым перемещениям в узлах сопряжения пролётных строений с опорами проведена в рамках (рабочая двухпараметрическая модель) модели изгибных поперечных колебаний четырёхпролётной балки, в опорных сечениях жёстко закреплённой относительно поперечных и упруго относительно угловых перемещений.

При вариации коэффициентов жёсткости угловым перемещениям $\mu_{0\div 4}$ минимальное различие частот собственных колебаний модели от частот неразрезного четырёхпролётного строения достигается при $\mu_{1\div 3} = 5$ и $\mu_0 = \mu_4 = 0$. Только значение третьей частоты вертикальных колебаний неразрезного четырёхпролётного строения отличается от частоты собственных колебаний модели на 4,5 %, при заданной точности измерения 3 %. Параметры предварительной и усечённой рабочей моделей, а также значения измеренных частот собственных колебаний четырёхпролётного строения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры предварительной и усечённой рабочей моделей, мост через р. Туру (λ_j определены относительно длины первого пролёта, $L_1 = 63$ м)

Предварительная модель, $\mu_{0\div 4} = 0$		Усечённая рабочая модель, $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 5, \mu_0 = \mu_4 = 0$		Пролётное строение мостового сооружения	
λ_j	$\tilde{p}_j = \frac{\lambda_j^2}{\lambda_1^2}$	λ_j	$\tilde{p}_j = \frac{\lambda_j^2}{\lambda_1^2}$	$\tilde{p}_j = \frac{p_j}{p_1}$	$p_j, \text{ Гц}$
1,8908	1,0	2,13333	1,0	1,0	0,844
2,6190	1,919	2,77231	1,68876	1,706	1,44
2,8474	2,267	3,11422	2,13100	2,038	1,72
3,5102	3,444	3,66735	2,95522	2,962	2,5

В рамках рабочей модели параметры неразрезного четырёхпролётного строения равны:

$$EI = \frac{4\pi^2 p_1^2 m L_1^4}{\lambda_{L1,1}^4} \approx 2,9 \cdot 10^7 \text{ тс} \cdot \text{м}^2 \text{ и } K_{\varphi,1\div 3} = \frac{\mu_{1\div 3} EI}{L_1} \approx 2,3 \cdot 10^6 \text{ тс} \cdot \text{м}, \quad (3)$$

где $p_1 = p_{1,1} \approx 0,844$ Гц – частота первой формы первой группы, $L_1 = 63$ м – длина первого пролёта; $\lambda_{L1,1} = 2,13333$ – первый корень частотного уравнения; $\mu_{1\div 3} = 5$ – коэффициент жёсткости в опорных сечениях угловым перемещениям; $m \approx 1,356$ тс·с²/м² – погонная масса неразрезного четырёхпролётного строения.

Согласно (3), значение жёсткости поперечного сечения верховой сплотки простому изгибу в рамках предварительной модели больше в 1,62 раза, чем в рамках рабочей модели.

3. Автодорожный мост через протоку Байбалаковскую, 17 км дороги Ханты-Мансийск – Нягань. Мост выполнен в виде балочной неразрезной системы с ездой поверху. В продольном направлении неразрезное шестипролётное строение моста выполнено по схеме $42,0 + 4 \times 63,0 + 42,0 = 336$ м. На карте амплитудного спектра передаточной функции вертикальных колебаний выделяются две группы спектральных пиков, что соответствует теоретическому спектру собственных колебаний модели (рис. 3).

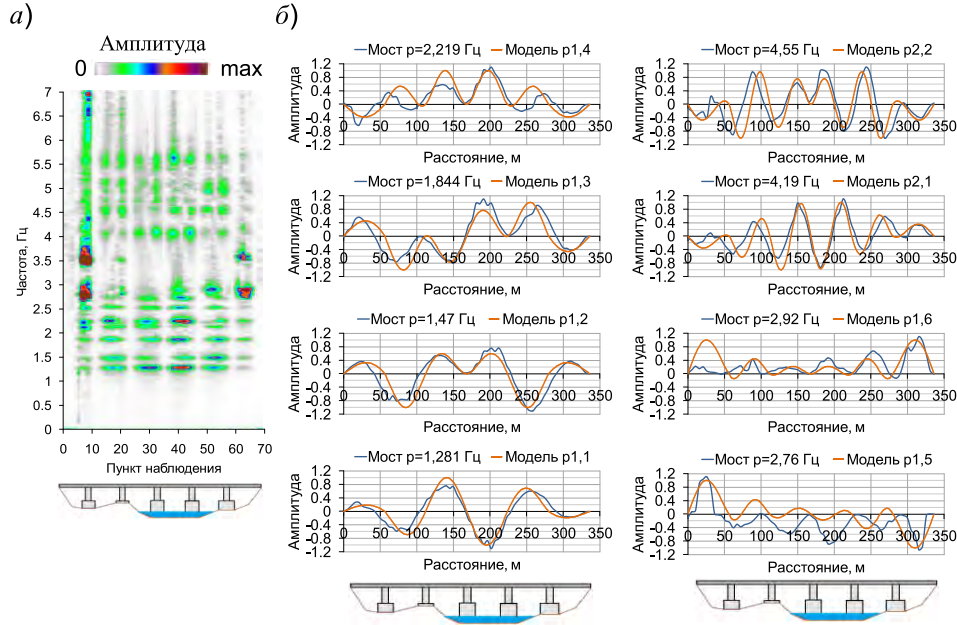


Рис. 3. Шестипролётный мост через протоку Байбалаковскую: а – карта амплитудного спектра передаточной функции; б – спектр эюр форм вертикальных смещений на резонансных частотах колебаний неразрезного шестипролётного строения моста и модели (собственные колебания)

На спектре передаточной функции вертикальных колебаний ярко выражены две группы спектральных пиков: $1,26 \div 2,9$ Гц – первая группа (зона); $3,47 \div 5,6$ Гц – вторая группа. Между диапазонами частот первой и второй групп ярко выражен частотный диапазон минимальных амплитуд колебаний. В полосе частот $1,26 \div 2,9$ Гц четко выделяются шесть спектральных пиков, соответствующих частотам первой группы вертикальных колебаний шестипролётной неразрезной балки на опорах. В полосе частот $3,47 \div 5,6$ Гц также выделяются шесть спектральных пиков второй группы, но менее выраженных по амплитуде. Колебания более высоких групп практически на спектрах отсутствуют. Результаты оценки упругих характеристик моста по данным сейсмометрического обследования представлены в работе [4].

Идентификация эюр форм смещений на резонансных частотах колебаний неразрезного шестипролётного строения производилась в рамках предварительной модели изгибных колебаний шестипролётной балки,

жёстко закреплённой относительно поперечных и свободно относительно угловых перемещений. В результате было выделено восемь частот резонансных колебаний неразрезного шестипролётного строения, эпюры смещений на которых соответствуют эпюрам собственных форм модели. Параметры усечённой рабочей модели установлены в результате вариации коэффициентов жёсткости угловым перемещениям в узлах сопряжения неразрезного шестипролётного строения с промежуточными опорами. В узлах сопряжения неразрезного пролётного строения с береговыми устоями коэффициенты жёсткости угловым перемещениям, как и в предыдущем случае, приняты равными нулю. Параметры предварительной и усечённой рабочей моделей, а также частоты собственных колебаний центральной части неразрезного шестипролётного строения мостового сооружения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры предварительной и усечённой рабочей моделей, мост через протоку Байбалаковскую (λ_j определены относительно длины пролёта, $L_2 = 63$ м)

Предварительная модель, $\mu_{0\div 6} = 0$		Усечённая рабочая модель, $\mu_0 = \mu_6 = 0, \mu_{2\div 5} = 2,1$		Пролётное строение мостового сооружения	
λ_j	$\tilde{p}_j = \frac{\lambda_j^2}{\lambda_1^2}$	λ_j	$\tilde{p}_j = \frac{\lambda_j^2}{\lambda_1^2}$	$\tilde{p}_j = \frac{p_j}{p_1}$	$p_j, \text{Гц}$
3,28359	1,0	3,52990	1,0	1,0	1,281
3,63197	1,2234	3,82921	1,17678	1,1468	1,469
4,06401	1,5318	4,19910	1,41510	1,4395	1,844
4,48985	1,8697	4,55068	1,66199	1,7322	2,219
5,33457	2,6394	5,42432	2,36138	2,1233	2,72
5,36498	2,6695	5,43956	2,37467	2,2795	2,92
6,49191	3,9088	6,61103	3,50763	3,1694	4,06
6,89810	4,4133	6,98111	3,91133	3,5519	4,55

В пределах ошибки измерений (3 %) значения только первых трёх частот собственных колебаний рабочей модели совпадают со значениями собственных частот неразрезного шестипролётного строения моста. Учитывая, что эпюры форм второй группы собственных колебаний неразрезного шестипролётного строения достаточно точно совпадают с соответствующими эпюрами модели, дальнейшее усложнение модели на этапе подготовки было признано нецелесообразным.

В рамках рабочей модели параметры шестипролётного неразрезного строения равны:

$$EI = \frac{4\pi^2 p_1^2 m L_1^4}{\lambda_{L1,1}^4} \approx 5,53 \cdot 10^6 \text{ тс} \cdot \text{м}^2 \text{ и } K_{\varphi,1\div 3} = \frac{\mu_{1\div 3} EI}{L_1} \approx 1,84 \cdot 10^5 \text{ тс} \cdot \text{м}, \quad (4)$$

где $p_1 = p_{1,1} \approx 1,281$ Гц – частота первой формы первой группы, $L_1 = 63$ м – длина первого пролёта; $\lambda_{L1,1} = 3,5299$ – первый корень частотного уравнения; $\mu_{2\div 5} = 2,1$ – коэффициент жёсткости в опорных сечениях угловым перемещениям; $m \approx 0,841$ тс·с²/м² – погонная масса неразрезного пролётного строения.

Согласно (4), значение жёсткости поперечного сечения неразрезного шестипролётного строения простому изгибу в рамках предварительной

модели больше в 1,34 раза, чем в рамках рабочей модели. Проектное значение жёсткости поперечного сечения пролётного строения моста равно $4,2 \cdot 10^6 \text{ тс}\cdot\text{м}^2$ [4].

4. Югорский вантовый мост через р. Обь в районе г. Сургута.

Автомобильный вантовый мост состоит из вантовой конструкции (вантовое сооружение) со сталежелезобетонным пролётным неразрезным строением (балки жёсткости) длиной $148 + 408 = 556 \text{ м}$, к которому примыкает балочный участок моста. Карта амплитудного спектра передаточной функции и эпюры вертикальных смещений балки жёсткости на первых восьми резонансных частотах колебаний, которые соответствуют эпюрам собственных колебаний модели, приведены на рис. 4, а и рис. 4, б соответственно.

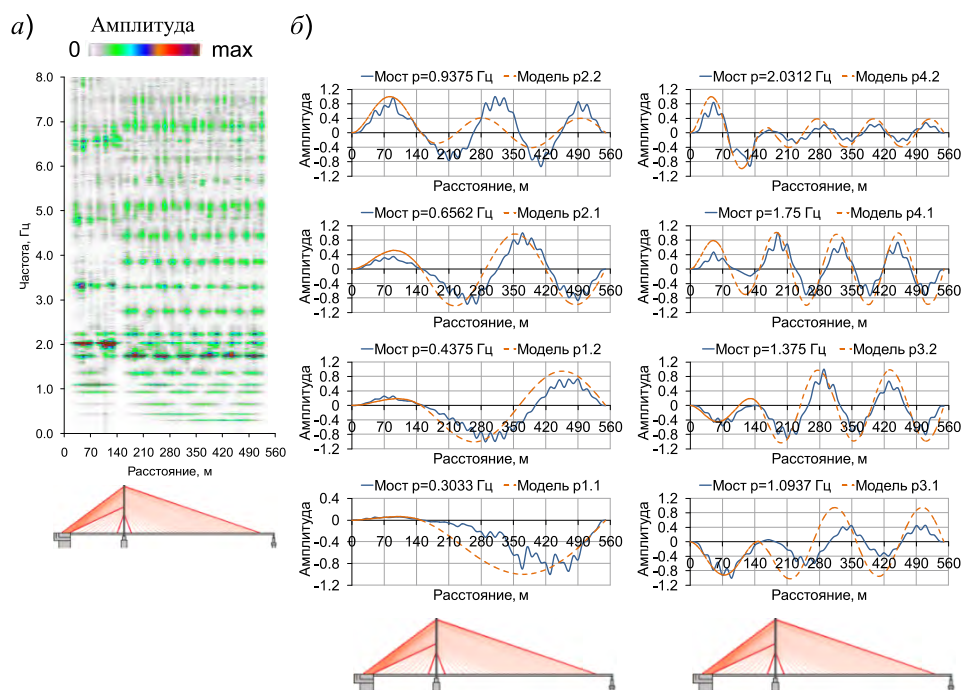


Рис. 4. Вантовое пролётное строение через р. Обь, г. Сургут:
 а – карта амплитудного спектра передаточной функции; б – спектр эпюр форм вертикальных смещений на резонансных частотах колебаний пролётного строения вантового сооружения и модели (собственные колебания)

В качестве моделей для идентификации эпюр форм вертикальных смещений балки жёсткости на резонансных частотах использовались две модели колебаний двухпролётной балки:

жёстко закреплённой относительно поперечных и угловых перемещений на опорах «0» и «2» и свободно относительно угловых перемещений на средней неподвижной опоре «жёсткое – шарнир – жёсткое» (ж-ш-ж);

жёстко закреплённой относительно угловых и поперечных перемещений на «0» опоре, свободно относительно угловых и жёстко относительно поперечных перемещений на «1» (средней) и «2» «жёсткое – шарнир – шарнир» (ж-ш-ш) опорах.

В результате проведения сравнительного анализа вида эпюр форм вертикальных смещений, построенных на центральных частотах спек-

тральных пиков спектра передаточной функции, установлено, что эпюры соответствуют эпюрам собственных изгибных колебаний двухпролётной балки. Наличие «опорного сечения» в районе расположения пилона также подтверждается видом годографа синтетических сейсмограмм распространения импульса вдоль балки жёсткости пролётного строения (рис. 5).

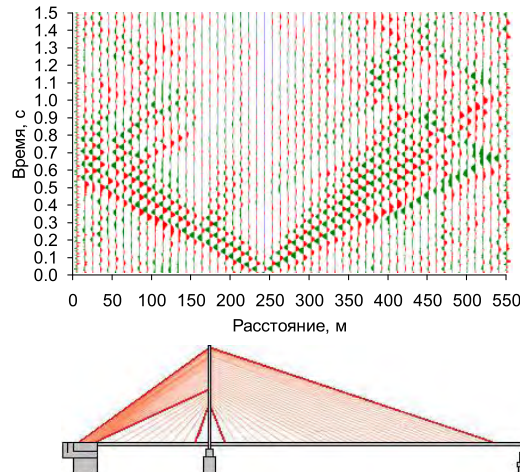


Рис. 5. Распространение вдоль балки жёсткости импульса с вертикальной поляризацией (углы наклона ветвей годографа синтетических сейсмограмм соответствуют скоростям распространения изгибных волн $V \approx 150\div 450$ м/с)

На годографе отчётливо видно, что отражение волны происходит не только от береговых устоев, но и в районе расположения пилона. Веер ветвей годографа, исходящих от виртуального пункта взрыва (опорный пункт), соответствует годографу распространения изгибных волн.

В результате было выделено 11 частот колебаний, соответствующих условиям пространственно-временного резонанса [8]. Параметры предварительной и рабочей моделей, а также измеренные частоты резонансных вертикальных колебаний балки жёсткости вантового сооружения моста приведены в табл. 4.

Наиболее близкими по значениям безразмерных частот собственных колебаний балки жёсткости являются частоты собственных колебаний модели колебаний двухпролётной балки с условиями опирания (ж-ш-ш), но эпюры форм собственных колебаний балки жёсткости точнее соответствуют эпюрам форм смещения модели с условиями опирания (ж-ш-ш).

Значения безразмерных частот собственных колебаний моделей, не зависимо от задаваемых условий опирания балки жёсткости на опоры, значительно отличаются от значений безразмерных частот собственных колебаний балки жёсткости вантового строения, что обусловлено влиянием вант на динамику пролётного строения.

На значения собственных частот вертикальных колебаний балки жёсткости, равномерное распределение вдоль пролётного строения крепление вант под углом оказывает влияние, соответствующее влиянию упругого полупространства, а также натяжение вант является причиной возникновения осевой силы. Учитывая, что крепление вант по схемам «веер» и

«звезда», которые использованы в вантовом сооружении, по сравнению со схемой «арфа» позволяют уменьшить сжимающие усилия, на втором этапе рассматривалась модель колебаний многопролётной балки, лежащей на упругом полупространстве.

Таблица 4

Параметры моделей, мост через р. Обь (λ_j определены относительно длины первого пролёта, $L_1 = 148$ м)

Модель (ж-ш-ш), $\mu_0 = \infty, \mu_1 = \mu_2 = 0$		Модель (ж-ш-ж), $\mu_0 = \mu_2 = \infty, \mu_1 = 0$		Балка жёсткости вантового сооружения	
λ_j	$\tilde{p}_j = \frac{\lambda_j^2}{\lambda_1^2}$	λ_j	$\tilde{p}_j = \frac{\lambda_j^2}{\lambda_1^2}$	$\tilde{p}_j = \frac{p_j}{p_1}$	$p_j, \text{Гц}$
1,33494	1,0000	1,6126	1,0000	1,000000	0,3033
2,42626	3,3033	2,6986	2,8006	1,442492	0,4375
3,49965	6,8727	3,7490	5,4051	2,163738	0,6562
4,26566	10,2105	4,3607	7,3126	3,091054	0,9375
4,81651	13,0179	5,0558	9,8299	3,606230	1,0937
5,84382	19,1633	6,1117	14,3643	4,533546	1,3750
6,88626	26,6098	7,1072	19,4253	5,769967	1,7500
7,48945	31,4757	7,5940	22,1769	6,697284	2,0312
8,18861	37,6267	8,4456	27,4303	7,418530	2,2500
9,24572	47,9686	9,5118	34,7930	9,067092	2,7500
10,2434	58,8801	10,4162	41,7240	10,89770	3,3052

Значения собственных частот изгибных колебаний модели определяются выражением (без учёта осевой силы):

$$p_{k1,k2}^2 = \frac{\lambda_{L_1,k1,k2}^4 EI}{4\pi^2 L_1^4 m} + \frac{k_p}{4\pi^2 m} \text{ или } p_j^2 = \lambda_{n,j}^4 a_{z,n} + d_z, \text{ Гц}, \quad (5)$$

где $a_{z,n} = \frac{EI}{4\pi^2 L_n^4 m}$; EI, m, L_n – жёсткость поперечного сечения балки простому изгибу, погонная масса и длина n -го пролёта соответственно; $d_z = \frac{k_p}{4\pi^2 m}$ – коэффициент отпорности основания в вертикальном направлении; k_p – коэффициент постели основания на погонный метр балки (коэффициент жёсткости); j – сквозной индекс номера форм; $k1$ – номер группы (зоны); $k2$ – номер частоты в группе (зоне); $\lambda_{L_n,k1,k2} = \lambda_{n,j}$ – характеристическое число (решение частотного уравнения), приведённое к длине пролёта L_n .

В результате аппроксимации спектра собственных изгибных вертикальных колебаний балки жёсткости, состоящего из 11 первых частот, спектром собственных частот модели было установлено, что наилучшая аппроксимация достигается в случае, если спектр собственных частот колебаний балки (ж-ш-ш) разделить на два спектра (рис. 6):

первый спектр (рис. 6, а), состоящий из первых четырёх p_{1+4} частот собственных вертикальных колебаний балки жёсткости (параметры: $a_z = 0,002361$ и $d_z = 0,0919$);

второй спектр (рис. 6, б), состоящий из частот p_{4+11} (параметры: $a_z = 0,000914652$ и $d_z = 0,923564564$).

При этом значения жёсткости поперечного сечения балки жёсткости простому изгибу в случае использования спектра $p_{4\div 11}$ примерно в 2,6 раза меньше, чем в случае использования спектра $p_{1\div 4}$.

Значительное различие значений жёсткости поперечного сечения балки жёсткости простому изгибу, которые соответствуют двум спектрам аппроксимации, является признаком несоответствия модели колебаниям балки жёсткости. Поэтому на третьем этапе была использована модель, учитывающая действие осевой силы. Частоты собственных изгибных колебаний балки, лежащей на упругом полупространстве, при действии осевой силы определяются выражением:

$$p_j^2 = n_{2,L1,j}^4 a_Z + c_Z n_{2,L1,j}^2 + d_Z, \text{ Гц}, \quad (6)$$

где $a_Z = \frac{EI}{4\pi^2 L_1^4 m}$, $c_Z = \frac{S}{4\pi^2 m L_1^2}$ и $d_Z = \frac{k_p}{4\pi^2 m}$ – коэффициенты, определённые относительно длины первого пролёта; S – осевая сила, (+) – растяжение, (-) – сжатие; $n_{2,L1,j}$ – корни частотного уравнения нагруженной системы, отнесённые к длине первого пролёта; j – сквозной индекс нумерации частот.

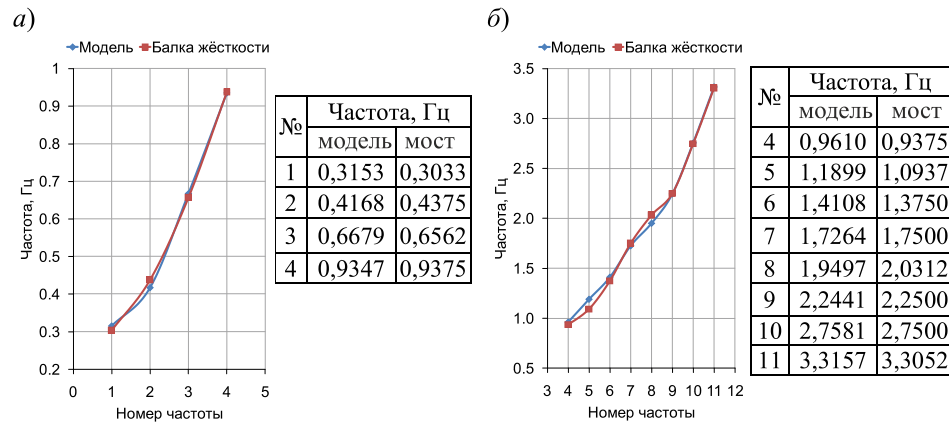


Рис. 6. Результаты аппроксимации спектра собственных частот вертикальных колебаний балки жёсткости спектром собственных частот модели: а – первый спектр, $p_{1\div 4}$; б – второй спектр, $p_{4\div 11}$

В случае если коэффициент нагрузки $K_S = \frac{SL^2}{2EI} < 5$, характеристические числа $n_{2,L1,j}$ нагруженной и λ_j ненагруженной систем отличаются не более чем на 6 %, поэтому аппроксимация спектра собственных частот пролётно-го строения вантового сооружения произведена спектрами собственных колебаний двух моделей (ж-ш-ш и ж-ш-ж) при $n_{2,L1,j} \approx \lambda_j$. Результаты аппроксимации приведены на рис. 7.

Формально спектры собственных частот моделей с высокой точностью соответствуют спектру собственных колебаний балки жёсткости вантового сооружения, что является признаком малого коэффициента нагрузки. Однако данная модель имеет следующие несоответствия:

знак осевой силы соответствует растяжению, что противоречит конструктивному исполнению пролётно-го строения вантового сооружения;

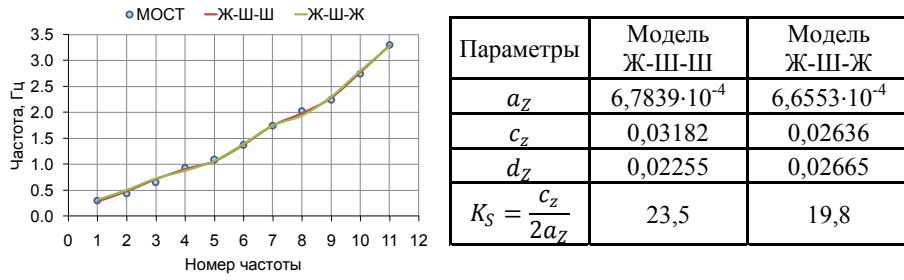


Рис. 7. Результаты аппроксимации спектра собственных частот вертикальных колебаний балки жёсткости спектром собственных частот модели

минимальное значение коэффициента нагрузки $K_S = 19,8$ значительно выше, чем предполагаемое значение, потому $n_{2,L1,j} \neq \lambda_j$, что противоречит точности аппроксимации.

Противоречия вызваны тем, что в модели не учитывается влияние на значения собственных частот колебаний эффекта инерции поворота поперечного сечения пролётного строения. Частоты собственных колебаний балки с учётом инерции поворота поперечного сечения определяются выражением:

$$p_j = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{a_n n_{2,Ln,j}^4 + c_n n_{2,Ln,j}^2 + d}{1 - b_n n_{2,Ln,j}^2}}, \text{ Гц}, \quad (7)$$

где $a_n = \frac{EI}{L_n^4 m}$; EI , m , L_n – жёсткость поперечного сечения балки простому изгибу, погонная масса и длина n -го пролёта соответственно; $c_n = \frac{S}{mL_n^2}$; $d = \frac{k_p}{m}$; k_p – коэффициент постели (жёсткости) основания; $b_n = \frac{I}{L_n^4 F}$, F – площадь поперечного сечения; j – сквозной индекс номера форм; $\lambda_{Ln,k1,k2} = \lambda_{n,j}$ – характеристическое число (решение частотного уравнения), приведённое к длине пролёта L_n .

Выражение спектра собственных частот (7) использовать для аппроксимации спектра собственных частот балки жёсткости с помощью приложения Excel крайне сложно. В случае малых значений b_n и c_n $n_{2,L1,j} \approx \lambda_j$, а выражение (7), пренебрегая членами второй степени малости, можно представить в виде:

$$p_j = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{a_n \lambda_{n,j}^4 + c_n \lambda_{n,j}^2 + d}{1 - b_n \lambda_{n,j}^2}} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{a_n \lambda_{n,j}^4 + (c_n + db_n) \lambda_{n,j}^2 + d}, [\text{Гц}]. \quad (8)$$

В данном случае коэффициент при $\lambda_{n,j}^2$ определяется не только осевой силой, но отпорностью вертикальным смещениям и инерцией поворота поперечного сечения, поэтому данный коэффициент на данном этапе обработки не представляет практической ценности.

Значения $a_z = 6,6553 \cdot 10^{-4} \div 6,7839 \cdot 10^{-4}$, $d_z = 0,02255 \div 0,02665$ определяют следующие параметры пролётного строения вантового сооружения:

$$\begin{aligned} EI &= 4\pi^2 L_1^4 m a_z \approx (1,34 \div 1,36) \cdot 10^7 \text{ тс} \cdot \text{м}^2, \\ k_p &= 4\pi^2 m d_z \approx 0,944 \div 1,115 \text{ тс/м}^2, \end{aligned} \quad (9)$$

где $m = 1,06 \text{ тс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2$; $L_1 = 148 \text{ м}$.

Заключение

В результате проведённых исследований было установлено, что при проведении инженерно-сейсмометрических обследований с использованием стандартной сейсмометрической станции при измерении частот собственных колебаний с точностью $\Delta f = \pm 0,015625$ Гц (спектральное разрешение) без специального программного обеспечения, предназначенного для решения обратной спектральной задачи, можно произвести оценку средних значений следующих параметров мостовых сооружений:

- жёсткости поперечного сечения пролётных строений;
- жёсткости угловым смещениям в опорных сечениях.

Оперативная оценка упругих характеристик пролётных строений мостовых сооружений может осуществляться в рамках нескольких двухпараметрических моделей, которые определяют диапазон возможных значений упругих характеристик пролётных строений.

Выбор окончательной модели требует анализа дополнительной информации, в качестве которой можно использовать:

спектр эпюр форм собственных колебаний пролётных строений для определения упругих характеристик пролётных строений согласно положениям теории сопротивления материалов;

зависимость изменения коэффициента когерентности колебаний в пунктах, расположенных в середине пролёта и на опорах моста, а также характеристики упругих изгибных волн, распространяющихся вдоль пролётного строения [4].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Ахтямов А.М.** К единственности решения одной спектральной задачи // Дифференциальные уравнения. 2003. Т. 39. № 8. С. 1011–1015.
2. **Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер И.** Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985, 344 с.
3. **Сабуров В.С., Кузьменко А.П.** Теория колебаний балки: [Электронный ресурс]. Муром: Учебно-методический центр МИ (фил.) ВлГУ, 2015. 179 с.
4. **Сабуров В.С., Кузьменко А.П.** Оценка технического состояния мостовых сооружений посредством детальных сейсмометрических обследований // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2017. Т. 284. С. 69–81.
5. **Сабуров В.С., Кузьменко А.П.** Диссипативные характеристики механических систем: [Электронный ресурс]. Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2021. 93 с.
6. **Сабуров В.С., Кузьменко А.П.** Частоты и формы собственных колебаний многопролётной балки: [Электронный ресурс]. Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2019. 140 с.
7. **Сабуров В.С., Кузьменко А.П.** Обследование зданий повышенной этажности. Инженерно-сейсмометрический метод. LAMBERT Academic Publishing, 2013. 184 с.
8. **Кузьменко А.П., Сабуров В.С.** Обследование плотин гидроэлектростанций. Инженерно-сейсмометрический метод (часть 1): [Электронный ресурс]. Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2017. 206 с.
9. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2007613742, «ГЕОТОН-А» / А.Е. Гуськов, В.С. Сабуров, А.П. Кузьменко. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 03.09.2007.

10. **Свидетельство** об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2007611653, «ГЕОТОН-Т» / А.П. Кузьменко, В.С. Сабуров, И.А. Лучшев, А.Е. Гуськов. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.04.2007.

REFERENCES

1. Akhtyamov A.M. To the uniqueness of the solution of one spectral problem. *Differential Equations*. 2003;39(8):1061-1066. (In Russ.).
2. Timoshenko S.P., Yang D.H., Weaver I. Fluctuations in engineering. Moscow: Mechanical Engineering, 1985. 344 p. (In Russ.).
3. Saburov V.S., Kuzmenko A.P. Theory of beam vibrations: [Electronic resource]. Murom: Educational and Methodological Center of MI VSU; 2015. 179 p. (In Russ.).
4. Saburov V.S., Kuzmenko A.P. Assessment of the technical condition of bridge structures through detailed seismometric surveys. *Izvestiya VNIIG im. B. E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2017;284:69-81. (In Russ.).
5. Saburov V.S., Kuzmenko A.P. Dissipative characteristics of mechanical systems: [Electronic resource]. Novosibirsk: FRC ICT, 2021. 93 p. (In Russ.).
6. Saburov V.S., Kuzmenko A.P. Frequencies and forms of natural oscillations of a multi-span beam: [Electronic resource]. Novosibirsk: ICT SB RAS; 2019. 140 p. (In Russ.).
7. Saburov V.S., Kuzmenko A.P. Survey of high-rise buildings. Engineering seismometric method. Saarbrücken: LAMBERT Acad. Publ.; 2013, 184 p. (In Russ.).
8. Kuzmenko A.P., Saburov V.S. Inspection of hydroelectric dams. Engineering seismometric method (Part 1): [Electronic resource]. Novosibirsk: ICT SB RAS; 2017. 206 p. (In Russ.).
9. The certificate of state registration of computer programs No. 2007613742, «ГЕОТОН-А» / А.Е. Гуськов, В.С. Сабуров, А.П. Кузьменко. Registered in the Register of computer programs 03.09.2007. (In Russ.).
5. The certificate of state registration of computer programs No. 2007611653 «ГЕОТОН-Т» / А.П. Кузьменко, В.С. Сабуров, И.А. Лучшев, А.Е. Гуськов. Registered in the Register of computer programs 19.04.2007. (In Russ.).

Информация об авторах

А.П. Кузьменко – канд. техн. наук, старший научный сотрудник;
В.С. Сабуров – научный сотрудник.

Information about the authors

A.P. Kuzmenko – Cand. Sci. (Techn.), Senior Researcher;
V.S. Saburov – Research Fellow.

Статья поступила в редакцию 10.04.2023; одобрена после рецензирования 28.04.2023; принята к публикации 27.09.2023.

The article was submitted 10.04.2023; approved after reviewing 28.04.2023; accepted for publication 27.09.2023.

Научная статья
УДК 624.137.2:626/627

ХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ОТДЕЛЬНОСТЕЙ ГОРНЫХ ПОРОД В ОТКОСАХ КАМЕННО-ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН НА СЕВЕРЕ

Станислав Иванович Панов¹, Владимир Борисович Штильман²,
Евгений Валерьевич Волков³

^{1,2,3} АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия,

¹ panovsi@vniig.ru

² shtilmanvb@vniig.ru

³ volkov@vniig.ru

Аннотация. Рассмотрена возможность расчетного определения скорости роста первичных трещин в отдельностях горных пород, применяемых в качестве защиты низового откоса каменно-земляных плотин от морозного выветривания, с использованием элементов теории механики хрупкого разрушения и роста усталостных трещин.

Ключевые слова: *низовой откос, каменно-земляная плотина, Север, механика хрупкого разрушения, трещиноватая порода, длительная прочность, отдельности горных пород*

Для цитирования: Панов С.И., Штильман В.Б., Волков Е.В. Хрупкое разрушение отдельностей горных пород в откосах каменно-земляных плотин на Севере // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 309. С. 21–38.

Original article

THE BRITTLE DESTRUCTION OF ROCK PARTS IN THE SLOPES OF ROCK-EARTH DAMS IN THE NORTH

Stanislaw I. Panov¹, Vladimir B. Shtilman², Eugeny V. Volkov³

^{1,2,3} JSC «Vedeneev VNIIG», Saint-Petersburg, Russia.

¹ panovsi@vniig.ru

² shtilmanvb@vniig.ru

³ volkov@vniig.ru

Abstract: The article considers the possibility of calculating the growth rate of primary cracks in individual rocks used as protection of the downstream slope of rock-earth dams from frost weathering using elements of the theory of fatigue crack.

Keywords: *downstream slopes of rock-earth dams in the North, mechanics of brittle fracture of fractured rocks in the slopes of such dams and measures to increase the long-term strength of individual rocks in downstream slopes of rock fill dams*

For citation: Panov S.I., Shtilman V.B., Volkov E.V. The brittle destruction of rock parts in the slopes of rock-earth dams in the north. *Proceedings of the VNIIG. 2023;309:21-38. (In Russ.)*.

Введение

Известно, что в каменно-земляных плотинах, возведенных в северной строительной-климатической зоне (ССКЗ), отдельности горной массы на поверхности откосов упорных призм подвержены криогенному выветриванию (КВ), приводящему к увеличению раскрытия существующих в них трещин вплоть до разделения этих отдельностей на части [1–5]. При этом уменьшаются не только показатели характеристик прочности отдельностей горных пород, но и значения общей устойчивости на сдвиг откосов подобных плотин.

Известно также, что процессы выветривания отдельностей горной массы на поверхностях низовых откосов каменно-земляных плотин обусловлены циклически изменяющимися факторами природного воздействия на такие плотины в условиях ССКЗ [6, 7]. В частности, большим перепадом сезонных изменений температуры каменной наброски на поверхности откосов, достигающим в условиях ССКЗ 80 °С и более; сезонными переходами этих температур через 0 °С; расклинивающим действием пленок воды, попадающей в трещины отдельностей при атмосферных осадках и фильтрации через плотину; силовым воздействием льда в этих трещинах и др.

Как отмечено в работе [8], в изделиях из трещиноватых конструктивных материалов многократные изменения напряжений и деформаций как по величине, так и по знаку обычно приводят к постепенному накоплению в них повреждений, а затем и к нарушению целостности всего изделия. Эти процессы получили название *усталостного разрушения*.

Отмеченное позволяет считать, что КВ горных пород является одной из форм проявления процессов усталостного разрушения отдельностей с трещинами.

В связи с этим представляется целесообразным использование детально разработанного и проверенного на практике математического аппарата теории механики хрупкого разрушения [8–10] при количественной оценке изменений во времени процессов и последствий постепенного разрушения отдельностей горных пород на поверхности низовых откосов каменно-земляных плотин, эксплуатируемых в условиях ССКЗ.

Основные типы трещин в массивах и отдельностях горных пород

Результаты многочисленных инженерно-геологических изысканий и геотехнических исследований горных пород [11] позволяют считать, что при оценке свойств отдельностей горных пород в ССКЗ можно выделить следующие основные типы возникающих в них нарушений сплошности: первичные трещины, трещины разгрузки и трещины усталостного разрушения отдельностей этих пород.

Первичные трещины в массивах и отдельностях горных пород

Трещины этого типа возникают в массивах горных пород еще на стадиях остывания магматического расплава породообразующих материалов или непосредственно после завершения этих процессов. Подобные трещины имеют микроскопическое раскрытие, различное очертание и разную

протяженность (от долей миллиметров до десятков и даже сотен метров). Характерной особенностью таких трещин является большая вероятность их расположения практически в любом месте вмещающего их горного массива, а также возможность различной их пространственной ориентации. Эти особенности первичных трещин обусловлены тем, что они являются следствием всей сложной предыстории существования вмещающих их горных массивов [11].

В работах по механике хрупкого разрушения [8–10] используется основополагающее допущение того, что в любых средах с трещинами при изменениях их напряжений и деформаций происходит обмен упругой энергией между деформируемой средой и внутренними поверхностями первичных трещин в ней. При этом внутренние поверхности подобных трещин являются своеобразными накопителями избыточной энергии, возникающей в горной среде при её деформировании. За счет этого приращение энергии первичные трещины увеличивают как свою длину, так и величину раскрытия.

В расчетных моделях этих процессов используется также очень важное допущение об их *необратимости*. Под этим понимается отсутствие обратных уменьшений раскрытия и длины трещин при сохранении или при уменьшении ранее достигнутых напряжений во вмещающей их среде.

Трещины разгрузки отдельностей

Работы по изготовлению каменных отдельностей, предназначенных для укладки в тело каменно-земляных плотин, обычно выполняются в карьерах горных пород с использованием буровых работ, взрывчатых веществ (ВВ) и различных режущих устройств. Требуемые геометрические размеры отдельностей назначаются в рабочих проектах плотин, в соответствии с которыми в специализированных организациях разрабатываются проекты проведения буровзрывных работ и выбираются типы ВВ. Эти специальные вопросы здесь далее не рассматриваются.

В данном случае практический интерес представляет лишь оценка возможных изменений напряжений и деформаций в отдельностях горных пород, которые могут произойти в них после извлечения из вмещавшего их ранее массива.

Как правило, значения сжимающих напряжений и деформаций в отдельностях горных пород, полученных после взрыва ВВ, существенно меньше тех, которые имели место в горном массиве до разработки в нем карьера. Это обусловлено несопоставимо меньшими размерами отдельностей в сравнении с размерами всего массива.

Принцип необратимости дает основание считать, что динамическая разгрузка отдельностей от существовавших ранее в массиве напряжений обычно не приводит к существенным изменениям длины и величины раскрытия первичных трещин, имевшихся ранее в массиве горных пород.

Вместе с тем, следует иметь в виду, что наброска отдельностей пород в тело плотины и их последующее уплотнение различными строительными механизмами могут приводить к локальным изменениям их внутренних напряжений и деформаций [4]. Эти процессы, несмотря на их локальный характер, могут влиять на величину возможного раскрытия и длину первичных трещин в отдельностях горных пород.

Трещины усталостного разрушения отдельностей

Особенности поведения первичных трещин в природных массивах, а также возможные изменения трещиноватости самих отдельностей при их укладке в тело плотины следует учитывать при оценке дальнейших их изменений в процессе криогенного выветривания отдельностей горных пород [6].

В теоретических моделях, представленных в работах [13, 14], предложено относить к факторам, влияющим на интенсивность процессов КВ отдельностей горных пород, следующие их свойства и характеристики:

- объемные напряжения;
- гидростатическое давление в трещинно-поровом пространстве;
- плотность воды и льда в трещинах отдельностей;
- проницаемость промороженных зон низовых упорных призм;
- температуры начала и окончания процессов замерзания и оттаивания пород;
- градиенты температур в частично промороженных зонах плотин.

Обилие перечисленных характеристик, по всей видимости, расширяет возможности математического анализа причин и последствий КВ отдельностей горных пород, проводимого в рамках названных теоретических моделей. Однако при этом следует согласиться с мнением авторов работы [6] о том, что практическое использование таких моделей весьма затруднено, поскольку большая часть этих характеристик горных пород не может быть определена экспериментально. В связи с этим их приходится задавать весьма условно.

Более того, многофакторность указанных расчетных моделей делает их практически бесполезными при решении конкретных инженерных задач количественного прогноза интенсивности процессов КВ отдельностей горных пород в откосах плотин, возводимых в условиях ССКЗ.

Криогенное выветривание и усталостное разрушение пород

В классических инженерных дисциплинах (теории упругости, теории пластичности, теории ползучести и в ряде других) успешно решаются вопросы, связанные с обеспечением целостности сооружений в течение всего срока их эксплуатации. При этом сооружение считается несоответствующим проектным требованиям, если в каком-либо из его элементов возникают сколь угодно малые зоны нарушения сплошности.

Вместе с тем, в более поздних работах [8–10] было показано, что между моментами возникновения первичных трещин и разрушением сооружений всегда существует весьма большой промежуток времени, в течение которого состояние и эксплуатационная пригодность сооружения практически полностью соответствуют требованиям проекта. Представленные в этих работах расчетные модели могут быть использованы для количественного учета большинства факторов циклически изменяющегося во времени воздействия на процессы усталостного разрушения горных пород на поверхности низовых откосов каменно-земляных плотин, эксплуатируемых в условиях ССКЗ.

Процесс усталостного разрушения отдельностей горных пород на низовых откосах плотин, по всей видимости, можно представить следующим образом.

После завершения строительства плотины отдельности горных пород, как правило, имеют лишь первичные трещины с микроскопическим раскрытием. В процессе эксплуатации плотин под действием сезонно изменяющихся нагрузок и внешних воздействий происходит увеличение раскрытия и длины этих трещин. Таким образом, последствия процессов КВ отдельностей горных пород и процессы их усталостного разрушения практически идентичны. Те и другие, в конечном счете, приводят к увеличению раскрытия и длины первичных трещин, вплоть до разделения этих отдельностей горных пород на части меньших размеров.

Геометрическая схема роста трещин усталостного разрушения конструктивных материалов с трещинами, приведенная в работе [8], показана на рис. 1.

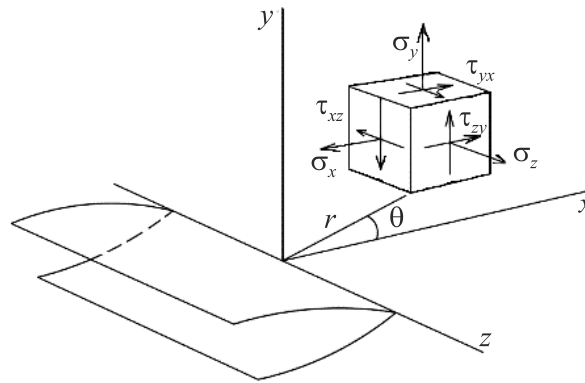


Рис. 1. Головная часть трещины, а также схема координат и напряжений в ней:
 x, y – направления движения трещины; z – фронт движения трещины вдоль оси x ;
 θ и r – угол и величина отклонения направления движения трещины от оси x

В работе [8] приведены также выражения (1), (2) и (3), использованные далее при определении значений нормальных напряжений σ_y , приложенных к обоим берегам трещины, влияющих на ее дальнейшее движение и на соответствующие этому расчетные значения смещений u_x начальных точек трещины в направлении оси x :

$$\sigma_y = \frac{\sum K_i}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + (\dots); \quad (1)$$

$$u_x = \frac{\sum K_i}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) + (\dots). \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) принято, что $\sum K_i$ – это сумма так называемых коэффициентов интенсивности напряжений от всех одновременно действующих на отдельность нагрузок, приложенных к обоим берегам трещины в ней, u_x – расчетные значения смещений вдоль оси X фронта трещины и симметричных точек на ее обоих берегах.

С учетом типов нагрузок и схем их действия коэффициенты интенсивности напряжений и расчетные значения смещений могут быть определены с использованием ряда приложений, приведенных в работах [8, 9].

В данном случае особый интерес представляют значения напряжений и смещений точек поверхности трещины, лежащих непосредственно на оси x , для которых значения угла θ равны нулю. Более того, слагаемые выражений (1) и (2), обозначенные символом (...), относятся к факторам, влияние которых на рост трещины пренебрежимо мало [9]. Поэтому далее эти выражения представлены в следующем более простом виде:

$$\sigma_y = \frac{\sum K_i}{\sqrt{2\pi r}}; \quad (1,a)$$

$$u_x = \frac{\sum K_i}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} (1 - 2\nu); \quad (2,a)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad (3)$$

где E , ν и μ – значения модуля упругости породы отдельностей на сжатие, ее коэффициента Пуассона и константы Ламе, определяемые экспериментально методами, хорошо известными в механике деформируемого твердого тела [10].

Характеристики и нагрузки на отдельности горных пород, расположенных на поверхности низового откоса плотины

Нагрузки, передающиеся на берега трещин в отдельностях горных пород, определены далее применительно к конкретным формам и размерам этих отдельностей.

Объект расчета – каменно-земляная плотина Вилюйской ГЭС высотой 75 м, введенная в постоянную эксплуатацию в 1967 г. Отдельности горных пород в низовой упорной призме представлены сохранными диабазами.

Далее в расчетах использованы известные литературные данные о значениях основных механических характеристик горных пород отдельностей, расположенных на поверхности низового откоса плотины. В частности, для сохранных диабазов приняты следующие значения физико-механических характеристик: объемная масса (плотность) $\rho \approx 2700$ кг/м³; модуль упругости пород на сжатие $E \approx 1,5 \times 10^{10}$ Н/м²; коэффициент Пуассона $\nu \approx 0,21$; коэффициент вязкости разрушения пород $K_{Ic} \approx 2,5 \times 10^6$ Н/м^{3/2}; удельная поверхностная энергия $\gamma \approx 200$ Дж/м².

По данным натурных наблюдений, среднегодовые значения температуры воздуха в районе расположения плотины Вилюйской ГЭС достигают величины минус 8 °С. Минимальные значения температуры отдельностей на поверхности низового откоса плотины зимой достигают минус 35 °С, а ее максимальные значения летом на поверхности низового откоса равны плюс 35 °С.

Далее принято, что поверхностный слой низового откоса плотины представлен отдельностями диабазов в виде прямоугольных параллелепипедов (рис. 2). Эти отдельности имеют следующие геометрические размеры: толщина $t = 20$ см, высота $b = 50$ см, длина отдельностей $L = 100$ см. Допущено, что на верхних гранях отдельностей имеются одиночные первичные вертикальные трещины ("надрезы") с начальной глубиной $l_0 \approx 1$ см.

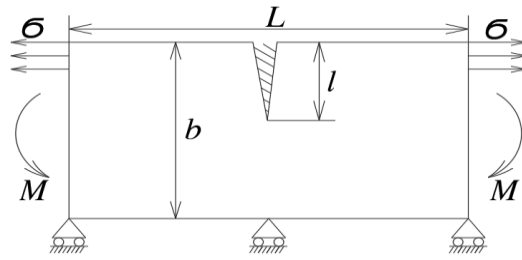


Рис. 2. Схема нормативного случая нагружения отдельных

Нагрузки, действующие на отдельные, расположенные на низовом откосе плотины, циклически (сезонно в течение каждого года) изменяются от минимальных значений летом, до максимальных значений зимой.

Эти нагрузки передаются на отдельные горных пород, расположенные на поверхности низового откоса плотины по схеме, показанной на рис. 2.

С целью упрощения этой схемы далее допущено, что блоки поверхностного слоя низового откоса опираются на поверхность низового откоса своими нижними гранями через три ряда поперечных условно шарнирных опор. Допущено также, что эти опоры расположены под торцевыми гранями блоков и на середине длины отдельных.

В таких условиях блоки отдельных на поверхности низового откоса плотины будут работать как двухпролетные трехопорные неразрезные балки.

Летом нагрузки на каждую такую балку будут иметь значения, обусловленные только ее собственным весом. При этом изгибающий момент в таких балках будет равен

$$M_{\text{лето}} = 0,125 \times q_{\text{св}} \times l_{\text{п}}^2 = 0,125 \times 270 \times 0,5^2 = 8,4375 \text{ кг}\cdot\text{м}, \quad (4)$$

где $q_{\text{св}} = 270 \text{ кг/м}$ – погонный вес балки; $l_{\text{п}} = 0,5 \text{ м}$ – длина ее пролетов.

Для возможности использования приведенных в [8] типовых схем по определению коэффициентов интенсивности напряжений, значение изгибающего момента (4) в балке пересчитано на эквивалентное ему нормативное значение интенсивности осевого растяжения балки $\sigma_{\text{у лето}}$:

$$\sigma_{\text{у лето}} = \frac{M_{\text{лето}}}{W} = \frac{M_{\text{лето}}}{t \times b^2/6}, \quad (5)$$

где W – момент сопротивления балки с толщиной сечения $t=0,2 \text{ м}$ и его высотой $b=0,5 \text{ м}$, равный $W = 0,2 \times 0,5^2/6 = 0,008333 \text{ м}^3$.

Летом минимальное значение растягивающих напряжений в блоках отдельных будет равно

$$\sigma_{\text{у лето}} = 8,4375 / 0,008333 = 1012,54 \text{ кг/м}^2 \approx 9,93 \times 10^3 \text{ Н/м}^2. \quad (6)$$

Зимой нагрузки на балку отдельные могут возрасти за счет веса снега на ее поверхности и давления льда $\sigma_{\text{л}}$ в ее первичных трещинах.

Без учета давления льда изгибающий момент в этой балке будет равен

$$M_{\text{зима}} = 0,125 \times (q_{\text{св}} + q_{\text{сн}}) \times l_{\text{п}}^2 = 0,125 \times (270 + 40) \times 0,5^2 = 9,6875 \text{ кг}\cdot\text{м}, \quad (7)$$

где $q_{\text{сн}} = 200 \times 0,2 = 40 \text{ кг/м}$ – снеговая нагрузка на балку.

Для возможности использования приведенных в [8] типовых решений по определению коэффициентов интенсивности напряжений, значение изгибающего момента (7) в балке элемента пересчитано в эквивалентное ему значение интенсивности осевого растяжения

$$\sigma_{узима} = \frac{M_{зима}}{W} = \frac{M_{зима}}{t \times b^2 / 6}. \quad (8)$$

Отсюда значение интенсивности продольного растяжения в балке отдельности (без учета давления льда $\sigma_{л}$ в трещинах) будет равно

$$\sigma_{узима} = 9,6875 / 0,008333 = 1162,547 \text{ кг/м}^2 \approx 11,40 \times 10^3 \text{ Н/м}^2. \quad (9)$$

Полученное по выражению (9) расчетное значение продольного растягивающего напряжения в блоке отдельности зимой может возрасти на величину давления льда $\sigma_{л}$ в вертикальных первичных трещинах. Схема проникновения воды в эти трещины в отдельностях пород на откосе плотины весьма проста. Атмосферные осадки и талые воды, стекая по поверхности низового откоса, попадают в эти трещины. Далее эта вода превращается в лед, который оказывает давление на оба берега трещины (рис. 3).

Известно, что при замерзании вода увеличивает свой объем почти на 10 %. Также известно, что лёд при избыточном давлении на него приобретает весьма большую текучесть. В связи с этим, максимальное давление льда $\sigma_{л}$ [12], передаваемое на берега трещины, происходит с переменной по глубине трещины интенсивностью, пропорциональной относительной длине трещины l_i/b

$$\sigma_{л} = 0,62 \times l_i / b \times 10^6, \text{ Н/м}^2. \quad (10)$$

В этом случае расчетное значение растягивающих напряжений в блоке отдельности на поверхности низового откоса будет равно

$$\sigma_{узима} = (11,4 \times 10^3 + 0,62 \times l_i / b \times 10^6), \text{ Н/м}^2. \quad (11)$$

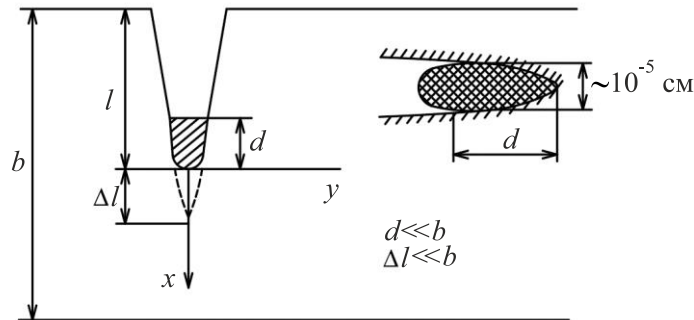


Рис. 3. Схема силового воздействия льда на берега первичных трещин

Следует отметить, что полученные значения напряжений относятся только к случаю работы отдельностей по схеме неразрезной балки с тремя опорами в течение всего срока эксплуатации плотины. Соблюдение этого условия возможно при тщательной обработке поверхности отдельностей породы в карьере и при штучной их укладке (но не при наброске) на поверхность низового откоса.

Как показано далее, при несоблюдении этого условия расчетное значение нагрузки на отдельности породы в поверхностном слое низового откоса плотины будет иметь величину, существенно превышающую нагрузку, определенную по выражению (11).

Летом отдельности на низовом откосе плотины будут работать как и рассмотренные выше двухпролетные трехопорные неразрезные балки. Действующие на них нагрузки будут соответствовать значениям, определенным выше по выражению (9).

Для зимы в данном варианте расчета допущено, что, в связи с температурным сокращением длины блока, один из его концов может сойти с опор в одном из крайних рядов (рис. 4). В таких условиях блок отдельностей будет работать как неразрезная двухопорная балка с односторонней консолью, нагруженная расчетными значениями от её собственного веса и слоя снега с погонной интенсивностью $q_{сн} = 250 \times 0,2 = 50$ кг/м. При этом общая вертикальная нагрузка на консоль будет равна:

$$P = 270 \times 0,5 + 250 \times 0,2 \times 0,5 = 160 \text{ кг.} \quad (12)$$

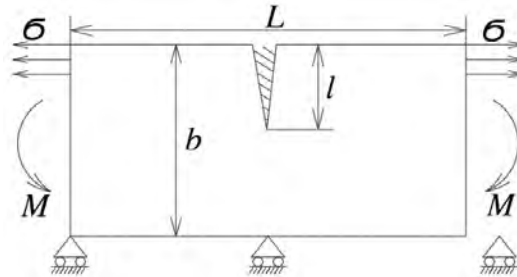


Рис. 4. Схема максимального нагружения отдельности зимой

Максимальное значение изгибающего момента в консольной части блока длиной $l_k = 0,5$ м будет равно

$$M_{\text{зима}} = \frac{Pl_k^2}{2} = \frac{160 \times 0,5^2}{2} = 20 \text{ кг}\cdot\text{м.} \quad (13)$$

Отсюда значение продольного растяжения в балке отдельности равно

$$\sigma_{\text{узима}} = 20 / 0,008333 = 2400,1 \text{ кг/м}^2 \approx 23,54 \times 10^3 \text{ Н/м}^2. \quad (14)$$

Полученное значение растягивающих напряжений зимой может возрасти на величину давления льда в трещине $\sigma_{\text{л}}$, определенную по выражению (10)

$$\sigma_{\text{узима}} \approx (23,54 \times 10^3 + 0,62 \times l_i/b \times 10^6), \text{ Н/м}^2. \quad (15)$$

Результаты расчетов по определению значений продольных растягивающих напряжений σ_y в балках отдельностей для четырех расчетных случаев (РС), представлены в табл. 1 и использованы далее при определении значений коэффициентов интенсивности напряжений в отдельностях пород [8].

Таблица 1

Расчетные значения растягивающих напряжений в балках отдельностей

РС	Сезон	Расчетная схема	Напряжения σ_{yi} , Н/м ²
1, 2	Лето	Балка на 3-х опорах	$9,93 \times 10^3$
3	Зима	Балка на 3-х опорах со снегом и льдом в трещине	$11,4 \times 10^3 + 0,62 \times l_i/b \times 10^6$
4	Зима	Балка на 2-х опорах с консолью, снегом и льдом в трещине	$23,54 \times 10^3 + 0,62 \times l_i/b \times 10^6$

Определение коэффициентов интенсивности напряжений

В приведенных далее результатах расчетов использованы следующие обозначения: K_{\min} и K_{\max} – коэффициенты интенсивности напряжений при минимальных и максимальных значениях растягивающих напряжений σ_{yi} , действующих в блоках отдельностей на низовом откосе плотины в пределах каждого из циклов их нагружения.

Значения этих коэффициентов определены в табл. 2 и 3 с использованием расчетных схем нагружения отдельностей, рекомендованных в работе [8], и выражения (16) для определения расчетных значений K_i при значениях растягивающих напряжений, приведенных в табл. 1. Желтым цветом в табл. 2 и 3 выделены строки, соответствующие границам участков

$$K_i = \sigma_{yi} \sqrt{l_i} \zeta \frac{l_i}{b} + 0,62 \times 10^6 \times \frac{l_i}{b}, \text{ Па} \cdot \text{м}^{1/2}. \quad (16)$$

Сопоставление диаграмм $K_i = f(l_i/b)$ для рассмотренных выше случаев нагружения свидетельствует, что на каждой из диаграмм усталостного роста трещин можно выделить по три характерных участка 1, 2 и 3, границы которых обозначены на рис 5 и 6 маркерами красного цвета.

Таблица 2

Значения $K_{\min} = f(l_i/b)$ для расчетных случаев 1 и 2 табл. 1 (сезон – лето, расчетная схема – неразрезная балка на трех опорах)

l_i , см	l_i/b	$\sqrt{l_i} \zeta$	ζ	$\sigma_{y \min}$, Н/м ²	K_{\min} , Па·м ^{1/2}	Участки
2	0,04	2,877	2,034	0,029	0,082	начало
8	0,16	6,822	2,412	0,068	0,462	участок 1
10	0,20	12,367	3,193	0,123	1,519	граница 1-2
20	0,40	18,165	4,062	0,180	3,277	участок 2
25	0,50	27,128	5,426	0,269	7,308	
35	0,70	66,087	11,171	0,656	43,369	
40	0,80	105,248	16,641	1,045	109,996	
45	0,90	166,263	24,785	1,651	274,500	граница 2-3
46	0,92	181,826	26,809	1,806	328,291	
47	0,94	198,685	28,981	1,973	391,994	участок 3
48	0,96	216,923	31,310	2,154	467,264	
49	0,98	236,626	33,804	2,350	556,000	доллом

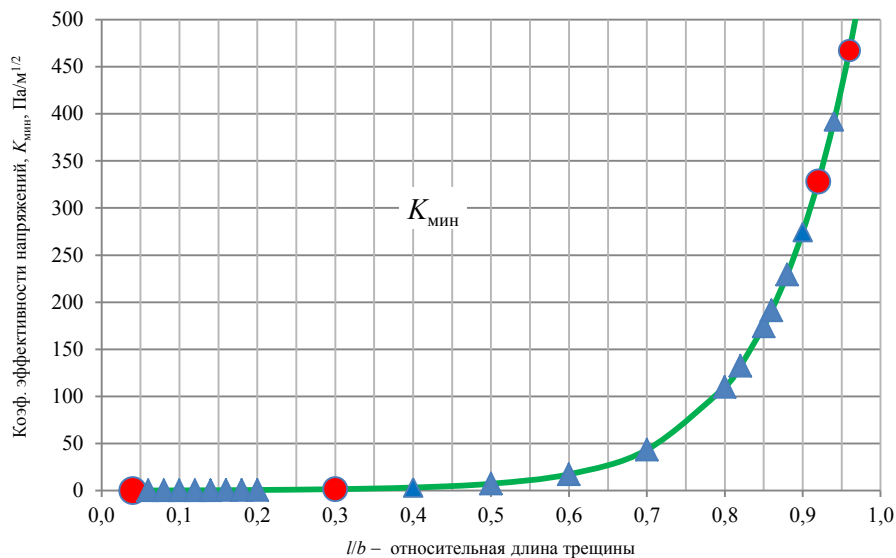
Таблица 3

Значения $K_{\max} = f(l_i/b)$ для расчетного случая 4 табл. 1
(сезон – зима, расчетная схема – неразрезная балка на двух опорах
с одной консолью и льдом в трещинах)

l_i , см	l_i/b	$\sqrt{l_i} \zeta$	ζ	$\sigma_{y \text{ мин}}$, Н/м ²	$K_{\text{мин}}$, Па·м ^{1/2}	Участки
2	0,04	2,877	2,034	0,093	0,291	начало
8	0,16	6,822	2,412	0,260	1,872	участок 1
10	0,20	12,367	3,193	0,477	6,087	граница 1-2
20	0,40	18,165	4,062	0,676	12,520	участок 2
30	0,60	41,820	7,635	1,356	57,099	
35	0,70	66,087	11,171	1,990	131,927	
40	0,80	105,248	16,641	2,974	313,456	
45	0,90	166,263	24,785	4,472	744,060	граница 2-3
46	0,92	181,826	26,809	4,851	882,529	
47	0,94	198,685	28,981	5,260	1045,635	участок 3
48	0,96	216,923	31,310	5,702	1237,400	
49	0,98	236,626	33,804	6,178	1462,432	доллом

На первых участках этих диаграмм (при значениях l/b от $\approx 0,04$ до $\approx 0,30$) трещины в отдельностях пород на откосе плотины практически не растут. В связи с этим далее принято, что верхняя граница этих участков (при $l/b \approx 0,30$) соответствует моменту начала активного роста трещины.

На вторых участках диаграмм (при значениях l/b от $\approx 0,30$ до $\approx 0,92$) рост активных трещин происходит достаточно закономерно на каждом из шагов увеличения значений растягивающих напряжений σ_y .

Рис. 5. Диаграмма значений $K_{\text{мин}} = f(l_i/b)$

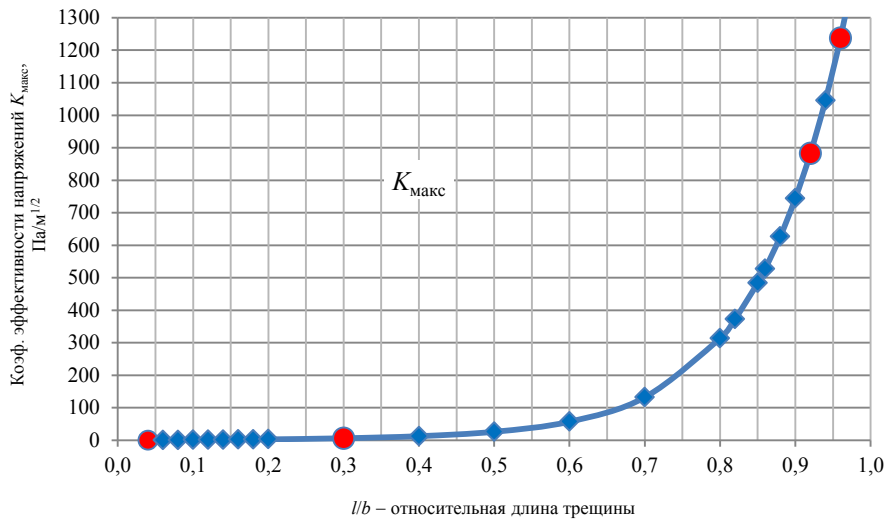


Рис. 6. Диаграмма значений $K_{\max} = f(l_i/b)$

На третьих участках диаграмм (при l/b от $\approx 0,92$ до $\approx 0,96$, что соответствует приращению длины трещины приблизительно лишь на 2 см) скорость этого приращения, как правило, не поддается точному количественному определению, поскольку все третьи участки диаграмм трещина пересекает практически мгновенно.

Более того, анализ диаграмм $K_i = f(l_i/b)$, представленных на рис. 5 и 6, свидетельствует, что их первые и третьи участки имеют практически линейное очертание.

Отмеченное выше позволяет выполнять дальнейшие расчеты по определению скорости роста активных трещин только на вторых участках, границы которых соответствуют изменениям значений l_i/b в диапазоне 0,30–0,92.

В связи с этим в работе [8] предложено при проведении предварительных расчетов по оценке долговечности отдельностей горных пород (в том числе и для отдельностей, грубо обработанных в карьерах) использовать выражение (17), предложенное П. Парисом [16] еще в 1964 г. и затем неоднократно модифицированное рядом других авторов:

$$\frac{dl}{dn} = A \times \left\{ \frac{K_{\max} - K_{\text{beg}}}{K_{\text{end}} - K_{\max}} \right\}^m, \quad (17)$$

где $\frac{dl}{dn}$ – максимальная скорость роста наиболее активных трещин в отдельностях пород в мм за один (годовой) цикл их нагружения; K_{beg} и K_{\max} – расчетные значения минимальных и максимальных коэффициентов интенсивности напряжений, достигнутых на втором участке диаграмм; K_{end} – конечные значения этих коэффициентов, достигнутые в конце третьих участков диаграмм; A – безразмерный эмпирический коэффициент; m – показатель степени.

Значения указанных выше коэффициентов, полученные в результате обработки диаграмм (см. рис. 5 и 6), представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчетов, выполненных по выражению (17)

K_i (рис. 6 и 7)	РС 1	РС 4
K_{beg} , Па·м ^{1/2}	1,52	6,09
$K_{\text{макс}}$, Па/м ^{1/2}	328,29	882,53
K_{end} , Па/м ^{1/2}	556,00	1237,43
$K_{\text{макс}} - K_{\text{beg}}$, Па/м ^{1/2}	326,77	876,44
$K_{\text{end}} - K_{\text{макс}}$, Па/м ^{1/2}	227,71	354,90
$(K_{\text{макс}} - K_{\text{beg}})/(K_{\text{end}} - K_{\text{макс}})$	1,44	2,47
A	10^{-3}	10^{-3}
m	0,53	0,53
dl/dn , мм/цикл	4,86	8,37
$t_{\text{дв}}$ – долговечность отдельных, лет	490/4,86 ≈ 101	490/8,37 ≈ 58,5

Долговечность отдельных горных пород на поверхности низового откоса плотины Вилюйской ГЭС

Долговечность нормальной эксплуатации отдельных горных пород на низовых откосах плотин, эксплуатируемых в условиях ССКЗ, зависит от поперечных размеров отдельных в направлении возможного развития трещин и максимальной скорости их роста.

С учетом отмеченного, скорость роста усталостных трещин в отдельных породах на поверхности низового откоса Вилюйской плотины определялась по выражению (17) с использованием данных, приведенных в табл. 4.

В расчетном случае РС 1 (см. табл.4) допущено, что отдельные породы на поверхности низового откоса в течение всего года работают как двухпролетные трехопорные неразрезные балки. При этом в конструкции отдельных предусмотрено создание либо постоянно действующей, либо периодически возобновляемой гидроизоляции, предотвращающей попадание воды, стекающей по откосу, в первичную трещину и образование в этой трещине льда.

Как показано в табл. 4, в данном случае расчетное значение скорости роста длины первичных трещин равно 4,86 мм за каждый годовой цикл нагружения и разгрузки отдельности.

Выше было отмечено, что полная высота сечения отдельности была принята равной 500 мм, а длина существующей начальной трещины – 10 мм. Поэтому часть высоты сечения отдельности, в пределах которой возможен дальнейший рост трещины, не превышает 490 мм. Отсюда долговечность нормальной эксплуатации отдельных в расчетном случае их нагружения РС 1 $t_{\text{дв}1} = 490 / 4,86 \approx 101$ год.

Этот показатель полностью соответствует требованию о сроке нормативной долговечности при нормальной эксплуатации всех элементов плотины 1-го класса, равной 100 годам.

В расчетном случае РС 4 (при максимально возможном нагружении в зимнее время года) отдельности работают как неразрезные однопролетные балки с одиночной консолью. Более того, в этом случае допущена возможность попадания воды в первичную трещину и образования в ней льда. Как показано в табл. 4, в этом случае скорость роста длины трещины равна 8,37 мм/цикл. Отсюда $t_{дв\ 4} = 490 / 8,37 \approx 58,5$ лет.

Полученные для этого случая нагружения показатели долговечности отдельностей на низовом откосе Вилуйской плотины существенно меньше требуемого срока нормальной эксплуатации элементов сооружения 1-го класса и ее основных элементов.

Увеличение долговечности при нормальной эксплуатации отдельностей горных пород на откосах плотин, эксплуатируемых в условиях ССКЗ, возможно за счет улучшения качества изготовления отдельностей в карьерах, а также за счет штучной их укладки (но не наброски) на поверхность низового откоса плотины. Кроме того, решению этой проблемы должна способствовать и гидроизоляция верхней поверхности отдельностей, уменьшающая вероятность попадания воды в их первичные трещины и образования в них льда.

Заключение

1. В каменно-земляных плотинах, возведенных в ССКЗ, отдельности горных пород на поверхностях откосов низовых упорных призм подвержены интенсивному усталостному разрушению, приводящему к увеличению раскрытия существующих в них первичных трещин вплоть до разделения этих отдельностей на части. При этом могут уменьшаться значения не только показателей прочности отдельностей горных пород, но и общей устойчивости на сдвиг откосов подобных плотин.

2. Долговечность нормальной эксплуатации отдельностей горных пород и эффективность защиты низовых откосов таких плотин в условиях ССКЗ зависят от интенсивности процессов криогенного выветривания отдельностей. Попытки использования теоретических моделей процессов криогенного выветривания далеко не всегда были успешными, поскольку некоторые расчетные характеристики этих моделей не могут быть определены экспериментально.

3. Поскольку последствия процессов криогенного выветривания и усталостного разрушения трещиноватых конструктивных материалов практически идентичны, в данной работе предпринята попытка определения долговечности отдельностей трещиноватых горных пород на откосах каменно-земляных плотин, эксплуатируемых в условиях ССКЗ, с использованием методов механики хрупкого разрушения [8]. В результате получено, что в некоторых случаях нагружения отдельностей расчетные значения их долговечности существенно меньше значений, рекомендуемых современными нормативными документами.

4. Отмечено, что долговечность нормальной эксплуатации отдельностей горных пород на низовых откосах каменно-земляных плотин, эксплуатируемых в условиях ССКЗ, может быть существенно увеличена при использовании штучной укладки (а не наброски) этих отдельностей в поверхностный слой низовых откосов плотин.

5. Еще одним мероприятием, направленным на увеличение долговечности нормальной эксплуатации отдельных горных пород на поверхности низовых откосов каменно-земляных плотин на Севере, может служить постоянная или регулярно возобновляемая гидроизоляция верхней поверхности этих откосов. Эта процедура должна предупреждать свободный доступ талых или иных поверхностных вод в субвертикальные первичные трещины в откосах. Замерзание воды в этих трещинах приводит к существенному увеличению растягивающих напряжений от давления льда на стенки трещин и к сокращению долговечности их нормальной эксплуатации.

Наглядным подтверждением сделанных выше выводов является сопоставление фотографий поверхности низовых откосов двух каменно-земляных плотин, представленных на рис. 7 и 8. На первой из них показана поверхность низового откоса плотины Вилюйской ГЭС, построенной более 60-и лет назад. На второй фотографии (рис. 8) показан низовой откос болгарской плотины Белмекен высотой около 90 м, построенной примерно в то же время в суровых климатических условиях высокогорья при абсолютных отметках поверхности ее основания выше, чем 2000 м.



Рис. 7. Фрагмент участка низового откоса плотины Вилюйской ГЭС после 60-и лет ее эксплуатации

Следует отметить, что по высоте и по конструкции плотина Белмекен весьма похожа на плотину Вилюйской ГЭС. Практически совпадают как годы строительства, так и длительность эксплуатации этих двух плотин.

Несмотря на отмеченное соответствие двух названных плотин, современное состояние защиты поверхности их низовых откосов весьма различное.

Как видно из рис. 8, поверхность низового откоса плотины Белмекен в процессе ее строительства была покрыта тщательно уложенными poste-

листы каменными отдельностями. Это исключило возможность их неравномерного нагружения и деформирования в процессе эксплуатации плотины.



Рис. 8. Низовой откос каменно-земляной плотины Белмекен, защищенный плитчатыми каменными блоками

По данным натурных наблюдений, поверхность низового откоса Вилюйской плотины была отсыпана из рядовой каменной наброски, по всей видимости, недостаточно хорошо отсортированной.

Безусловно, что качественно выполненная защита поверхности низового откоса упорной призмы плотины Белмекен привела к некоторому увеличению стоимости строительных работ по возведению плотины. Однако, по информации службы эксплуатации этого сооружения, дополнительные затраты на работы по качественной защите поверхности низового откоса плотины Бельмекен весьма быстро окупались в процессе ее эксплуатации, а также при организации и проведении натурных наблюдений за состоянием и безопасностью эксплуатации элементов этого сооружения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Мызников Ю.Н., Панов С.И., Шахов Н.А.** Начальный период эксплуатации русловой плотины Курейской ГЭС // Гидротехническое строительство. 1989. № 10. С. 18.
2. **Панов С.И., Толошинов А.В., Цвик А.М.** Особенности температурно-деформационного поведения каменно-земляных плотин при длительной их эксплуатации в условиях Севера // Гидротехническое строительство. 2007. № 5. С. 18–22.
3. **Панов С.И.** Определение характеристик механических свойств горной массы по результатам испытаний ее отдельностей // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2013. Т. 269. С. 16–29.
4. **Панов С.И., Ротченко Ю.Г.** Механические свойства каменной наброски грунтовых плотин. СПб.: Изд-во АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2020. 100 с.

5. **Панов С.И., Волков Е.В.** Метод оценки изменений во времени механических свойств горной массы каменно-земляных плотин, длительно эксплуатируемых на Севере. // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2022. Т. 305. С 6–19.
6. **Воронков О.К., Ушакова Л.Ф.** К прогнозу морозного выветривания и морозостойкости скальных пород на территории СССЗ // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1980. Т. 137. С. 86–92.
7. **Воронков О.К., Ушакова Л.Ф.,** Влияние физического выветривания на состояние и свойства горных пород. СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2007. 156 с.
8. **Черепанов Г.Т.** Механика разрушения. М. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. 872 с.
9. **Партон В.З.** Механика разрушения от теории к практике. М.: Наука, 1990. 240 с.
10. **Работнов Ю.Н.** Введение в механику разрушения. М.: Наука, 1987. 82 с.
11. **Рац М.В., Чернышев С.Н.** Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. 164 с.
12. **Пехович А.И.** Основы гидроледотермики. Л.: Энергоатомиздат, 1983.
13. **Hallet B.** The breakdown of rock due to freezing: a theoretical model // Permafrost: Proc. 4th. Int. Conf. Permafrost. 1983. P. 433–438.
14. **Gilpin R.R.** A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soil // Water Resources Research. 1980. Vol.16. №5. P. 433–438.
15. **Paris P.C.** The fracture mechanics approach to fatigue // Proc. 10th Sigamore Armed Materials Research Conference. Syracuse Univ. Press. 1964.

REFERENCES

1. Panov S.I., Myznikov Yu.N., Shakhov N.A. The initial period of operation of the channel dam of the Kureyskaya HPP. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo – Hydraulic engineering*. 1989;10:18-22. (In Russ).
2. Panov S.I., Toloshinov A.V., Tsvik A.M. Characteristics of the temperature-deformation behavior of rock-and-earthfill dams during their long-term service in the North. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo – Hydraulic engineering*. 2007;5:18-22. (In Russ).
3. Panov S.I. Method of determination of mechanical property characteristics of rock mass by the test results of its singularity. *Izvestiya VNIIG im. B. E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2013;269:16-29. (In Russ).
4. Panov S.I., Rotchenko Yu.G. Mechanical properties of stone outline of ground dams: monograph. Saint Petersburg: JSC «Vedeneev VNIIG»; 2020. 100 с. (In Russ).
5. Panov S.I., Volkov E.V. Method for estimating changes over time of rock mass mechanical properties of earth and rock-fill dams operated for a long time in the North. *Izvestiya VNIIG im. B. E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2022;305:6-19. (In Russ.).
6. Voronkov O.K., Ushakova L.F. On the forecast of frost weathering and frost resistance of rocks on the territory of the northern construction and climatic zone. *Izvestiya VNIIG im. B. E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 1980;137:86-92. (In Russ).
7. Voronkov O.K., Ushakova L.F. The effect of physical weathering on the condition and properties of rocks. Saint Petersburg: JSC «Vedeneev VNIIG»; 2007. 156 p. (In Russ).
8. Cherepanov G.T. Mechanics of destruction. Moscow: Izhevsk: Institute of Computer Research; 2012. 872 p. (In Russ).
9. Parton V.Z. Mechanics of destruction from theory to practice. Moscow: Nauka; 1990. 240 p. (In Russ).

10. Rabotnov Yu.N. Introduction to the mechanics of destruction. Moscow: Nauka; 1987. 82 p. (In Russ).
11. Ratz M.V., Chernyshev S.N. Fracturing and properties of fractured rocks. Moscow: Nedra; 1970. 164 c. (In Russ).
12. Pekhovich A.I. Fundamentals of hydroledothermics. Leningrad: Energoatomizdat; 1983. 199 p. (In Russ).
13. Hallet B. The breakdown of rock due to freezing: a theoretical model. *Permafrost: Proc. 4th Int. Conf. Permafrost*. 1983. P. 433–438.
14. Gilpin R.R. A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soil. *Water Resources Research*. 1980;16(5):433-438.
15. Paris P.C. The fracture mechanics approach to fatigue. *Proc. 10th Sagamore Sagamore Army Materials Research Conference*. Syracuse Univ. Press; 1964.

Информация об авторах

С.И. Панов – доктор техн. наук, главный научный сотрудник;
В.Б. Штильман – доктор техн. наук;
Е.В. Волков – магистр, инженер.

Information about the authors

S.I. Panov – Dr. Sci. (Techn.), Chief Researcher;
V.B. Shtilman – Dr. Sci. (Techn.);
E.V. Volkov – Master's degree, Engineer.

Статья поступила в редакцию 05.04.2023; одобрена после рецензирования 21.08.2023; принята к публикации 27.09.2023.

The article was submitted 05.04.2023; approved after reviewing 21.08.2023; accepted for publication 27.09.2023.

Научная статья
УДК 627.82:550.34

О СОПОСТАВЛЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ КАМЕННО-НАБРОСНОЙ ПЛОТИНЫ С ЭКРАНОМ

Вячеслав Борисович Глаговский¹, Елена Давыдовна Гибянская²

^{1,2} АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия, GlagovskyVB@vniig.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы, связанные с оценкой сейсмостойкости каменно-набросной плотины с экраном. Приводятся, полученные авторами, результаты прогноза поведения плотины при двух заданных сейсмических воздействиях. Дан краткий анализ сопоставления результатов оценки сейсмостойкости той же плотины, выполненной двенадцатью другими авторами в рамках работы международного семинара. В целом, качественные оценки поведения плотины при сейсмических воздействиях совпадают, но количественные различия довольно велики.

Ключевые слова: *каменно-набросная плотина, сейсмические воздействия, оценка сейсмостойкости, сопоставление результатов*

Для цитирования: Глаговский В.Б., Гибянская Е.Д. О сопоставлении результатов оценки сейсмостойкости каменно-набросной плотины с экраном // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 309. С. 39–55.

Original article

ON THE COMPARISON OF THE RESULTS OF THE ASSESSMENT OF THE SEISMIC RESISTANCE OF A ROCKFILL DAM WITH A SCREEN

Vyacheslav B. Glagovsky¹, Elena Davydovna Gibyanskaya²

^{1,2} JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia, GlagovskyVB@vniig.ru

Abstract. The article deals with issues related to the assessment of the seismic resistance of a rockfill dam with a screen. Some results obtained by the authors of the prediction of the dam behavior under two specified seismic impacts are given. A brief analysis of the comparison of the results of the seismic resistance assessment of the same dam, performed by twelve other authors in the framework of the international workshop, is given. In general, the qualitative assessments of the dam's behavior under seismic impacts coincide, but the quantitative differences are quite large.

Keywords: *rockfill dam, seismic impacts, seismic resistance assessment, comparison of results*

For citation: Glagovsky V.B., Gibyanskaya E.D. On the comparison of the results of the assessment of the seismic resistance of a rockfill dam with a screen. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;309:39-55. (In Russ.).

Каменно-набросные плотины являются одним из самых распространенных видов водоподпорных сооружений. Они получили широкое распространение во всем мире за их безопасность, приспособляемость к ши-

рокому диапазону местных условий, практичность и экономичность строительства [1–3]. Каменно-набросные плотины в разных странах продемонстрировали надежную работу как в обычных условиях, так и в случаях значительной особой нагрузки, например, во время землетрясений. Фактически, после сильных землетрясений для такого рода плотин были зафиксированы или отсутствие существенных повреждений, или ограниченные повреждения (например, [4]). Последствия землетрясения проявлялись прежде всего в виде поверхностных трещин или локальных оползней вблизи гребня плотины [5].

Крупные плотины, начиная с 1930-х годов, проектировались с учетом необходимости обеспечения их сейсмостойкости. Тем не менее, большинство существующих плотин, построенных до 1990-х годов, были спроектированы с использованием либо критериев сейсмического проектирования, либо методов динамического анализа, которые можно считать устаревшими [6–9]. Сегодня уровень вычислительных методов может обеспечить оценку уровня сейсмостойкости каменно-набросных плотин в соответствии с передовыми знаниями и современными критериями.

Для оценки сейсмостойкости каменно-набросных плотин повышение давления поровой воды не является существенным фактором, влияющим на безопасность, а разжижение не является одним из ожидаемых режимов разрушения. Основное беспокойство вызывают деформации, трещины и другие виды локальных нарушений, так как они могут поставить под угрозу работоспособность плотины [10].

О постановке задачи для контрольного семинара

В сентябре 2019 г. в Милане состоялся 15-й контрольный семинар (benchmark workshop) Технического комитета А «Вычислительные аспекты анализа и проектирования плотин» Международной Комиссии по большим плотинам (ICOLD). Цель этих регулярно проводимых семинаров – сопоставительный анализ методик, алгоритмов и программных средств, применяемых при проектировании больших плотин для оценки их напряженно-деформированного состояния (НДС), устойчивости и др.

Для участников 15-го контрольного семинара в качестве Темы В была выбрана задача оценки сейсмостойкости каменно-набросной плотины. Предлагалось выполнить расчеты для анализа поведения каменно-набросной плотины с битумным экраном Мента с целью прогнозирования напряженно-деформированного состояния и деформаций плотины при сейсмических воздействиях [11].

Плотина Мента, построенная в период между 1987 и 2000 гг., расположена в южной Италии на высоте около 1400 м над уровнем моря. В самой глубокой точке плотина имеет высоту около 90 м, в водохранилище вмещается $1,8 \times 10^7 \text{ м}^3$ воды. Отметка гребня 1431,75 м, а нормальный уровень воды в водохранилище находится на отметке 1424,75 м.

Плотина характеризуется сложной формой, с главной частью, закрывающей долину р. Мента, которая имеет длину около 325 м на гребне, и изогнутой частью (около 125 м), которая опирается на седловину скалы, закрывающей долину с правой стороны. Форма и геометрия плотины очень сложны, так как поперечные сечения характеризуются переменной высо-

той и различными профилями сопряжения плотины с основанием. Поэтому для облегчения сравнения результатов участникам было предложено рассматривать только одно поперечное сечение в рамках задачи плоской деформации. Фильтрационный поток, возникающий в массиве фундаментных пород, не влияет ни на условия эксплуатации плотины с точки зрения напряженного состояния, ни на ее сейсмическое поведение. Поэтому было предложено пренебречь явлением просачивания в горном массиве основания и считать его непроницаемым.

Плотину предлагалось считать однородной. Материал каменной наброски – нелинейно-упругий, его прочность и жесткость зависят от уровня приложенных напряжений. Строительство плотины представлено тремя последовательными этапами.

Горный массив в основании плотины считается упругим. Механическое поведение битумного экрана является вязкоупругим.

Для расчета на сейсмическое воздействие предлагалось использовать записи двух землетрясений, произошедших в Италии (землетрясение Friuli произошло в 1976 г., землетрясение Central Italy – в 2016 г.). Записи акселерограмм были масштабированы так, чтобы пиковое ускорение было равно $0,26g$.

Некоторые особенности постановки задачи по теме В

Геометрия плотины, этапы строительства и сейсмические нагрузки были заданы разработчиками задачи. Некоторые аспекты численного моделирования намеренно не были определены, чтобы участники могли сделать свои собственные предположения и выбрать подходящие подходы к решению проблемы. В частности, участники могли выбрать свою собственную модель для описания циклического, нелинейного поведения материала наброски. Характеристики каменной наброски и возможная их зависимость от этапа строительства не задавались, а должны были определяться участниками на основе представленных организаторами данных. Предполагалось, что, сравнивая полученные таким образом решения, можно будет сделать выводы о том, как различные допущения и подходы влияют на результаты оценки сейсмостойкости плотины.

Ранее при постановке тем для контрольных семинаров участникам, как правило, предоставлялись полностью все исходные данные, а также некоторые данные натурных наблюдений за предшествующие годы, что создавало возможность калибровки модели. Организаторы же обладали данными натурных наблюдений за последний период и имели возможность сравнивать прогноз участников с реальным поведением плотины. В нашем случае такой возможности не было, поскольку плотина не подвергалась воздействию рассматриваемых землетрясений, и организаторы могли только сравнивать результаты оценки сейсмостойкости, представленные участниками.

О предполагаемых результатах расчетов

Организаторы просили участников семинара предоставить в обязательном порядке для возможности сравнения следующие результаты расчетов:

при оценке статического НДС плотины – начальное напряженно-деформированное состояние плотины после первого наполнения водохранилища до нормального уровня. Требовалось также определить первую частоту собственных колебаний плотины при незаполненном водохранилище и после его заполнения;

при оценке поведения плотины при сейсмических воздействиях – напряженно-деформированное состояние плотины с учетом зависимости жесткости от уровня сдвиговых деформаций и коэффициента демпфирования. Требовалось представить графики ускорения гребня плотины во время землетрясения и оценить смещения гребня относительно основания при сейсмическом воздействии.

О назначении физико-механических характеристик грунтов

Выбор физико-механических характеристик материала каменной наброски для статических и динамических расчетов каменно-набросных плотин является сложным и не до конца исследованным вопросом. Расчеты напряженно-деформированного состояния каменно-набросных плотин в соответствии с проектными характеристиками в этом смысле являются предварительными и дают лишь базовую оценку НДС плотины в процессе эксплуатации. Математические модели, разработанные на этапе проектирования, как правило, требуют уточнения и калибровки с учетом данных натурных наблюдений.

В работах [12–16] были изучены деформационные свойства материала каменной наброски для нескольких плотин в различных диапазонах сжимающих напряжений. Однако были протестированы грунты меньшей плотности, чем те, что использовались при строительстве плотины Мента. В недавней работе [17] крупнозернистые грунты были испытаны при плотности $2,2 \text{ т/м}^3$ горной массы при напряжениях сжатия до 10 МПа. Были получены значения модулей деформации до 500 МПа (в среднем около 250 МПа). Характеристики грунтов при сейсмических воздействиях подробно рассмотрены в монографии [18]. Специалисты АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» на протяжении ряда лет также проводили лабораторные исследования статических и динамических характеристик грунтов на приборах трехосного сжатия для различных плотин, и был накоплен определенный опыт оценки статических характеристик крупнозернистых грунтов [19].

Из данных, приведенных в формулировке темы В, на наш взгляд, нет однозначных ответов о назначении характеристик материалов плотины, и данные для калибровки модели отсутствуют. Имея это в виду, мы сделали следующие предположения. Плотина разделена на три зоны в соответствии с этапами строительства (рис. 1). Считалось, что модули статической деформации этих зон подлежат поэтапному изменению при переходе к следующему этапу строительства. Предполагалось также, что угол внутреннего трения является постоянным для каждой зоны и подлежит ступенчатому изменению между зонами. Динамические характеристики материала каменной наброски для модели HS small Plaxis также различаются в этих трех зонах и будут приведены ниже.

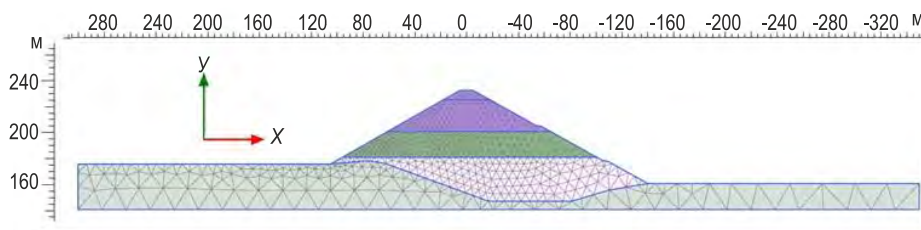


Рис. 1. Расчетная схема плотины

О методике расчетов и расчетной схеме, выбранной авторами

При выполнении расчетов и оценке сейсмостойкости плотины Мента авторы статьи следовали рекомендациям российских нормативных документов [20–23] и накопленному в институте опыту выполнения подобных расчетов (например, [24–26]).

Была выполнена серия расчетов плотины Мента с использованием программного комплекса Plaxis 2D [27]. В статическом расчете для каменной наброски использовалась модель Кулона-Мора, а в динамическом – реализованная в программе Plaxis 2D упругопластическая модель с упрочнением при малых деформациях. Расчетная схема представлена на рис.1, количество узлов сетки – 10599, элементов – 1283. Битумный экран в расчетной схеме не рассматривался, но верховая грань принималась водонепроницаемой, а материал плотины – естественной влажности. Размер области основания был выбран таким образом, чтобы исключить влияние боковых границ области на статическое напряженно-деформированное состояние плотины. В динамических расчетах боковые границы области основания принимались вязкими для того, чтобы избежать отражения волн от этих границ.

Ниже приведены некоторые из полученных результатов расчетов [28].

Статический расчет

В статическом расчете используется модель Кулона-Мора. Тело плотины – каменная наброска с характеристиками, приведенными в табл. 1. Для приближенного учета зависимости прочностных и деформационных характеристик от напряженного состояния их значения в слоях принимаются различными при расчете на разных стадиях строительства. Номер слоя в табл. 1 соответствует этапу строительства.

Таблица 1

Характеристики слоев каменной наброски

Стадии строительства	1			2			3		
Слой	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Угол трения, град	44	–	–	42	44	–	40	42	44
Модуль Юнга, МПа	250	–	–	300	250	–	350	300	250

По окончании строительства деформационные и прочностные характеристики по слоям плотины имеют значения, приведенные в столбце 3 табл.1. Удельный вес наброски составляет 23 кН/м^3 , а коэффициент Пуассона – 0,2.

Основание принималось линейно-упругим со следующими характеристиками: модуль упругости $2 \cdot 10^7 \text{ кН/м}^2$, коэффициент Пуассона 0,25, удельный вес 23 кН/м^3 .

После определения НДС плотины по окончании строительства выполнялся расчет НДС при наполнении водохранилища до расчетного уровня. Гидростатическое давление воды было задано соответствующей распределенной нагрузкой на верховой откос и основание плотины. Результаты расчета представлены на рис. 2 и 3.

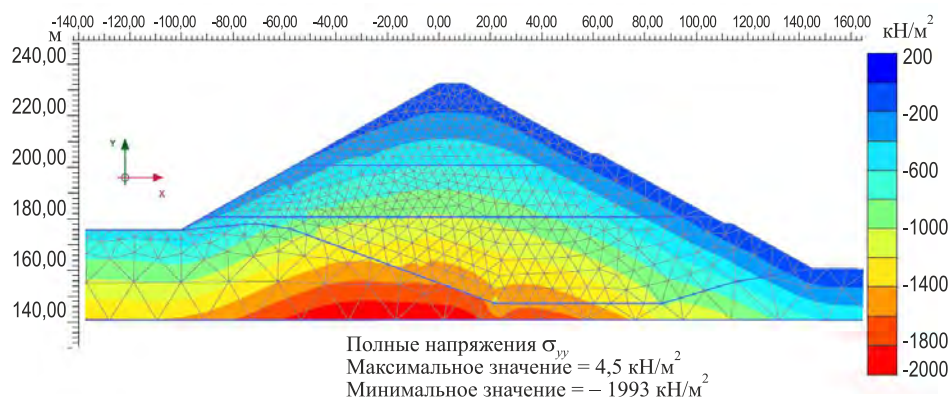


Рис. 2. Вертикальные напряжения σ_{yy}

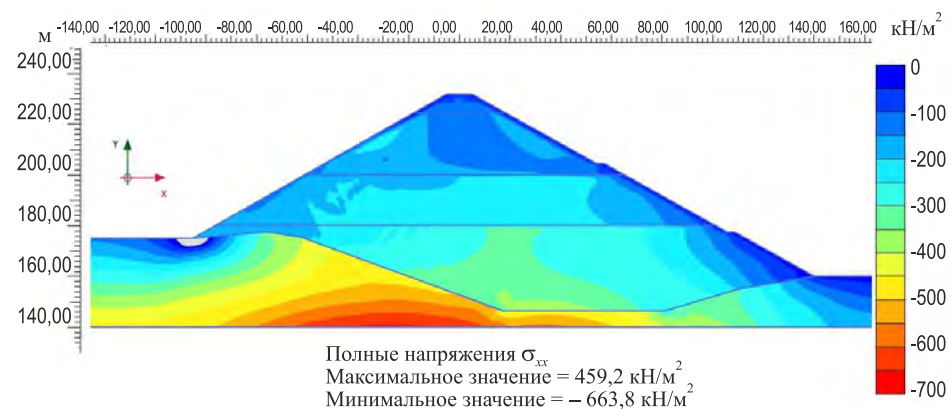


Рис. 3. Горизонтальные напряжения σ_{xx}

Расчеты на сейсмические воздействия

При расчетах плотины на сейсмическое воздействие использовались, записи двух сильных землетрясений, произошедших в Италии в 1976 г. (землетрясение Friuli) и в 2016 г. (землетрясение Central Italy).

При этих расчетах принимались следующие допущения. Скальное основание принималось невесомым, линейно упругим, модуль Юнга $E = 1400$ МПа, затухание 5%.

Для материала плотины принималась реализованная в программе Plaxis упругопластическая модель с упрочнением при малых деформациях. В расчетах принимались следующие характеристики материала плотины, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Динамические характеристики каменной наброски

Номер слоя	E_{50}^{ref} , МПа	E_{oed}^{ref} , МПа	E_{ur}^{ref} , МПа	G_0^{ref} , МПа	$\gamma_{0,7}$
1	350	350	1050	933	$2 \cdot 10^{-3}$
2	300	300	900	800	$2 \cdot 10^{-3}$
3	250	250	750	670	$2 \cdot 10^{-3}$

Примечание. Здесь E_{50}^{ref} – секущий модуль жесткости при стандартном трехосном дренированном испытании грунта; E_{oed}^{ref} – касательный модуль жесткости при первичном нагружении в одомере; E_{ur}^{ref} – жесткость при разгрузке/повторном нагружении; G_0^{ref} – значение модуля сдвига при сверхмалых деформациях; $\gamma_{0,7}$ – деформация сдвига, при которой модуль сдвига $G = 0,722G_0^{ref}$.

Для всех слоев затухание принималось равным 10 %. Остальные характеристики такие же, как и в статическом расчете.

Сейсмическое воздействие моделировалось заданными на нижней границе расчетной области акселерограммами землетрясений. Для простоты расчета принималось, что акселерограммы соответствуют нижней границе расчетной области. Из акселерограмм, полученных для трех координат, использовались только две – вертикальная и одна горизонтальная, имеющая бóльшую амплитуду.

Учет влияния водохранилища на НДС плотины при сейсмических воздействиях осуществлялся путем введения присоединенной массы в соответствии с российскими нормами [23]. Результаты расчетов показали, что динамическое взаимодействие грунтовой плотины с водохранилищем мало влияет на НДС плотины и, в частности, на величину ускорения на гребне. Это отмечалось и ранее многими исследователями, в частности, в известных работах [29, 30]. Поэтому в дальнейших расчетах наличие водохранилища учитывалось только приложенной нагрузкой от гидростатического давления на верховой откос и основание.

Результаты сейсмических расчетов приведены ниже.

Поведение плотины при землетрясении Friuli, 1976 год

Записи землетрясения Friuli показаны на рис. 4.

Остаточные смещения в теле плотины после землетрясения показаны на рис. 5, 6.

Горизонтальное смещение центральной оси на гребне составляет 1,78 см, а вертикальное смещение составляет 1,23 см.

Рис. 7 и 8 представляют ускорения и смещения точки на гребне во время землетрясения.

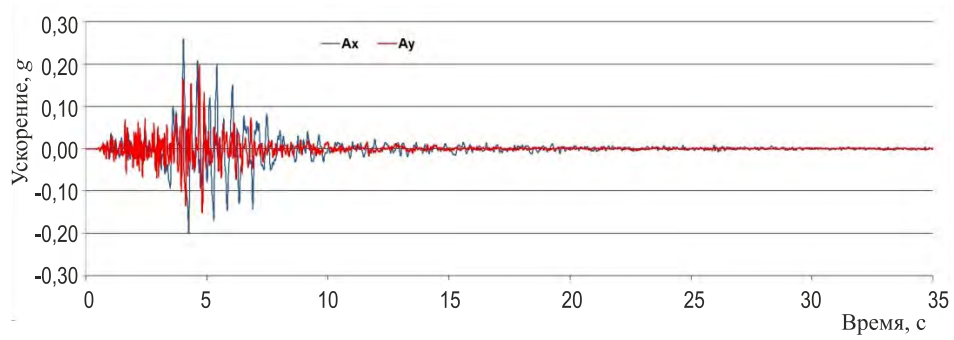


Рис.4. Акселерограммы землетрясения Friuli, 1976

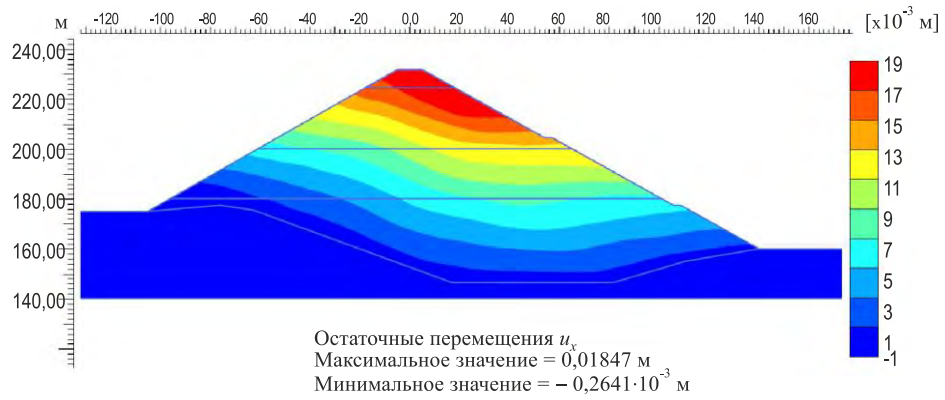


Рис. 5. Перемещение u_x

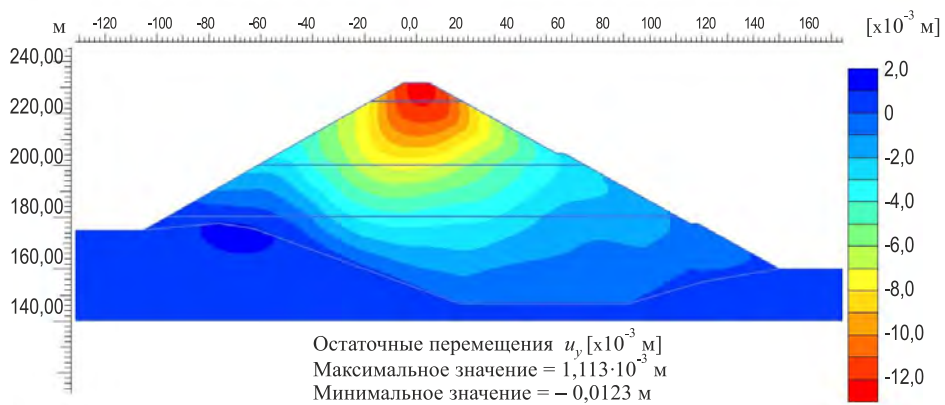


Рис. 6. Перемещение u_y

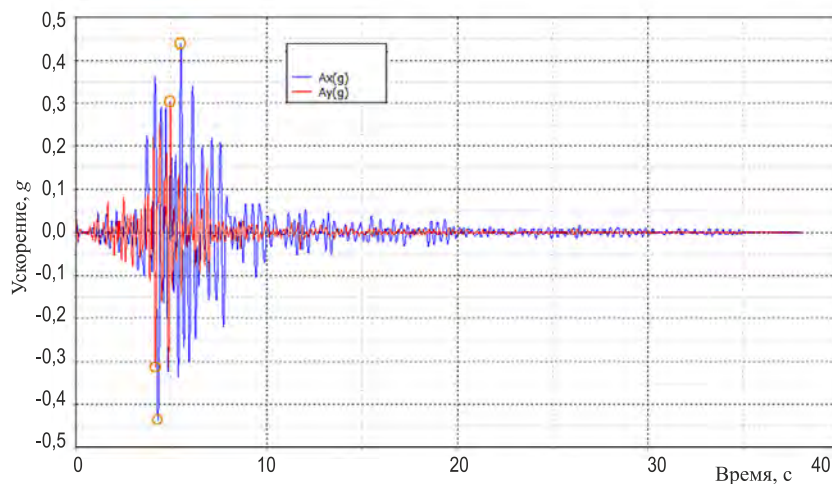


Рис. 7. Ускорения точки на гребне при землетрясении

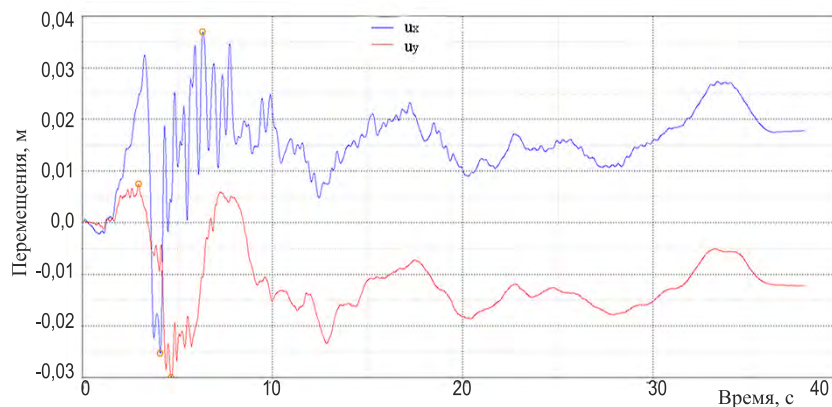


Рис. 8. Перемещения точки на гребне при землетрясении

Поведение плотины при землетрясении Central Italy, 2016 год

Записи землетрясения Central Italy показаны на рис. 9.

Остаточные смещения в теле плотины после землетрясения показаны на рис. 10, 11.

Горизонтальное смещение центральной оси на гребне составляет 0,43 см, а вертикальное смещение составляет 0,58 см.

Рис. 12 и 13 представляют ускорения и смещения точки на гребне во время землетрясения.

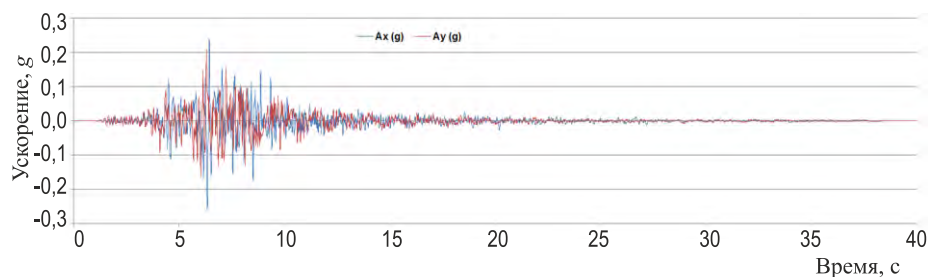


Рис. 9. Акселерограммы землетрясения Central Italy, 2016 г.

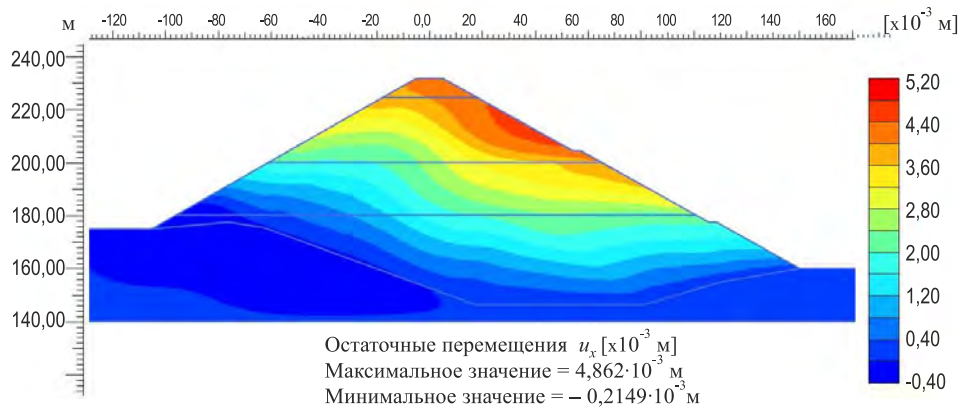


Рис. 10. Перемещение u_x

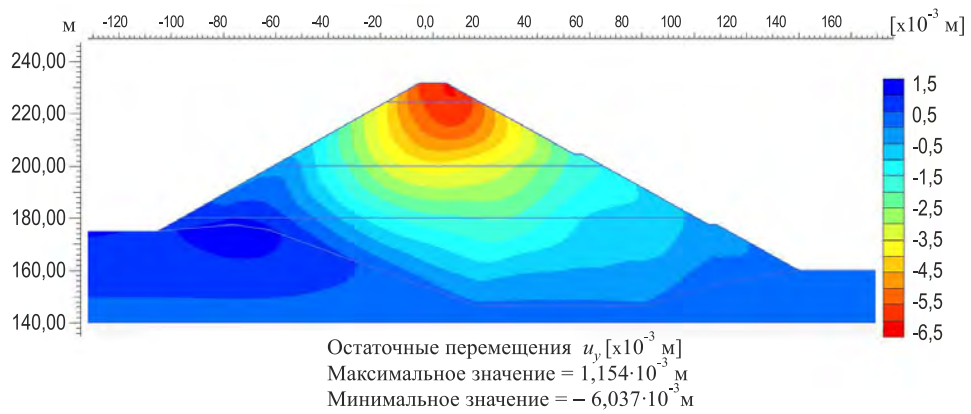


Рис. 11. Перемещение u_y

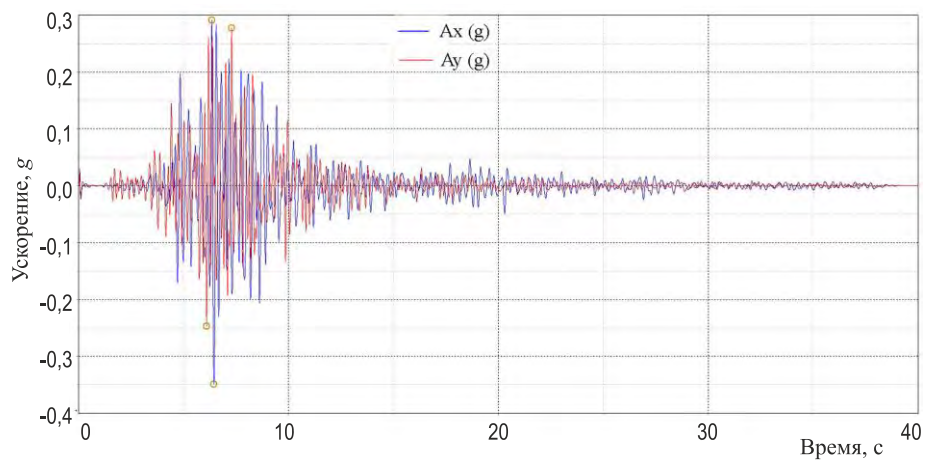


Рис. 12. Ускорения точки на гребне при землетрясении

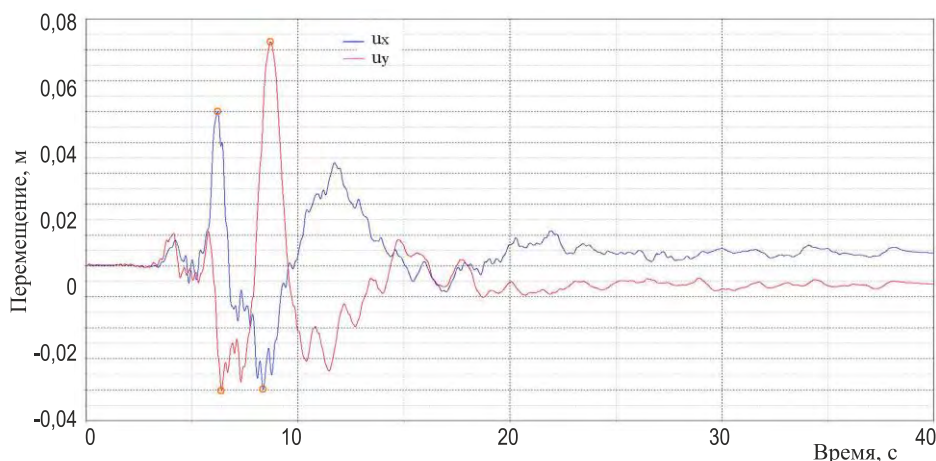


Рис. 13. Перемещения точки на гребне при землетрясении

О сопоставлении результатов расчетов

Свои результаты расчетов представили 13 команд-участников, среди которых 3 из Италии, 2 из Китая и по одной из Норвегии, Словакии, Франции, Швейцарии, Италии, Республики Македония, Австрии, США и России. В расчетах команды использовали различные программные комплексы: программу FLAC использовали 4 команды, GEOSTUDIO – 3, Plaxis 2D – 2, DIANA – 1, и по 1 участнику пользовались собственными программами расчета по методу конечных элементов – GEODYNA и Aster [31]. Некоторые результаты расчетов участников семинара приведены ниже.

В расчетах участники использовали несколько различных моделей для представления нелинейного поведения каменной наброски; в некоторых моделях принималось, что прочность зависит от уровня приложенного напряжения. Интерпретируя предоставленные организаторами результаты трехосных испытаний и используя литературные данные (включая национальные нормы и передовую практику), участники, в зависимости от выбранной модели грунта, определили значения деформационных характеристик каменной наброски, а также распределение угла трения внутри каменной наброски. Различие полученных участниками значений повлияло и на разницу в результатах расчетов.

Для сравнения результатов расчетов статического НДС плотины после окончания строительства и первого наполнения водохранилища, полученных рядом авторов с использованием различных программных комплексов, рассматривались значения горизонтальных и вертикальных напряжений в точке основания плотины на центральной оси и их соотношение K_0 (табл. 3, 4, 5, где n – количество участников, получивших такие значения; жирный шрифт – значения авторов статьи). Полученные участниками значения коэффициента K_0 варьируются от 0,25 до 0,43, что вполне согласуется с измерениями тензодатчика ($K_0 = 0,3–0,4$).

В табл. 6 приведены значения первой собственной частоты f колебаний плотины, полученные участниками для плотины до первого заполнения водохранилища.

Таблица 3

Значения горизонтальных напряжений

σ , КПа	380	400	450	500	550	650
n	1	1	1	7	1	1

Таблица 4

Значения вертикальных напряжений

σ , КПа	1350	1450	1476	1500	1520	1550	1600
n	1	1	1	6	1	1	1

Таблица 5

Значения коэффициента K_0

K_0	0,25	0,26	0,28	0,32	0,33	0,34	0,41	0,43
n	1	1	1	1	4	2	1	1

Таблица 6

Значение первой собственной частоты

f , Гц	2,32	2,18	1,85	1,82	1,3	1,09	0,95	0,9
----------	------	------	------	------	-----	-------------	------	-----

Сопоставление результатов поведения плотины при сейсмических воздействиях

Расчеты, выполненные участниками для прогноза поведения плотины Мента при воздействии землетрясений Friuli и Central Italy, показали, что при землетрясении Friuli (1976 г.) прогнозируются более серьезные последствия. Поэтому организаторами приводится сравнительный анализ некоторых результатов расчета на это землетрясение, полученных участниками [11].

Коэффициенты усиления ускорений на гребне плотины, то есть отношение ускорения на гребне к ускорению основания во время землетрясения, полученные участниками, приведены в табл. 7. Если исключить выпадающее из общего ряда значение 6,2, то получим среднее значение этого отношения 2,78, что согласуется с оценкой, приведенной в [32], согласно которой среднее значение коэффициента усиления для каменно-набросных плотин при рассматриваемом пиковом ускорении составляет около 2. Эти оценки были даны на основе анализа поведения во время землетрясений множества каменно-набросных плотин по всему миру.

Таблица 7

Коэффициенты усиления ускорений

$A_{гр}/A_{осн.}$	2,60	2,70	2,50	6,2	3,30	1,70	2,00	3,10	1,10	3,80	3,00	4,20	3,40
-------------------	------	------	------	-----	------	-------------	------	------	------	------	------	------	------

Относительные осадки гребня плотины, то есть наибольшие вертикальные перемещения, наблюдавшиеся во время землетрясения по отно-

шению к высоте плотины, были использованы в [33, 34] в качестве индекса для оценки ущерба, причиненного землетрясениями. По расчетам участников в нашем случае относительные осадки гребня лежат в диапазоне 0,01–1 %, что соответствует незначительным или умеренным повреждениям.

Максимальные остаточные смещения прогнозировались участниками на низовом откосе и вблизи гребня. Распределение смещений выглядит по-разному для двух разных землетрясений. Значения, полученные участниками, колеблются в довольно широких пределах, но в основном не превышают 40 см, то есть произошли очень ограниченные пластические деформации. Критерий повреждений, основанный на остаточных смещениях, был предложен в работе [35] применительно к естественным склонам: смещения менее 30 см означают умеренные повреждения. Никаких релевантных закономерностей развития сдвиговой деформации или поверхностей скольжения участниками обнаружено не было. Несмотря на различные допущения при моделировании, проведенные исследования показали удовлетворительные динамические характеристики плотины при предполагаемых сейсмических воздействиях.

Результаты расчетов, выполненных командами-участниками семинара для оценки поведения плотины при статических и сейсмических воздействиях, позволили сделать некоторые общие выводы [11]:

- наблюдается хорошее совпадение результатов расчетов статического НДС в конце строительства и после наполнения водохранилища, полученных с использованием различных численных методов, программных комплексов и моделей грунта;

- за исключением одного предложенного решения, независимо от выбранных численных методов, среднее отношение ускорения гребня к ускорению основания для плотины Мента для заданных сейсмических воздействий составляет около 2,8, однако разброс полученных значений достаточно велик – от 1,1 до 4,2;

- гидродинамическим давлением, как правило, пренебрегают. Считается, что это приводит к более консервативной оценке.

После рассмотрения предложенных участниками решений следует отметить, что геотехнические свойства и параметры были приняты, исходя из:

- предложенных организаторами экспериментальных лабораторных данных;

 - данных, полученных из предыдущих исследований;

 - литературных источников и руководств по программному обеспечению;

 - опыта, полученного из предыдущих исследований и инженерной практики;

 - комбинации всего перечисленного.

По-видимому, на полученные результаты не очень сильно влияет сложность моделей поведения грунтов и численных методов решений, и основные тенденции и механизмы поведения плотин достаточно хорошо описываются различными численными моделями. Установлено, что в зависимости от сейсмических условий по результатам большинства участников остаточные горизонтальные смещения варьируются в пределах 2–50 см, а вертикальные – в пределах 2–40 см, однако разброс значений также достаточно велик.

Заключение

Несмотря на различные допущения при численном моделировании плотины, выполненные расчеты показывают удовлетворительные динамические характеристики плотины Мента при предполагаемых сейсмических воздействиях. Результаты расчетов подтверждают, что каменно-набросная плотина Мента способна выдержать рассматриваемые землетрясения без значительных повреждений.

Однако следует отметить, что сопоставление результатов расчетов различных (весьма квалифицированных) участников семинара выявило большой разброс в количественных оценках ускорений плотины во время землетрясения и остаточных перемещений плотины после землетрясения. Проблема оценки сейсмостойкости крупных грунтовых гидротехнических сооружений при сильных сейсмических воздействиях требует дальнейшего продолжения исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Jansen RB (ed)**. Advanced dam engineering for design, construction, and rehabilitation. Van Nostrand Reinhold (ed), New York, 1988.
2. **Гольдин А.Л., Рассказов Л.Н.** Проектирование грунтовых плотин. М.: Изд-во АСВ, 2001. 384 с.
3. **Fell R., MacGregor P., Bell G., Foster M.** Geotechnical Engineering of Dams, 2nd edn., London: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2015.
4. **Foster M., Fell R., Spannagle M.** The statistics of embankment dam failures and accidents // Canadian Geotechnical Journal. 37(5): 2000. P. 1000–1024.
5. **Ishihara K.** Performances of rockfill dams during recent large earthquakes // 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. San Diego (California), 2010. P. 1–11.
6. **Красников Н.Д.** Сейсмостойкость гидротехнических сооружений из грунтовых материалов. М.: Энергоиздат, 1981. 240 с.
7. **Зарецкий Ю.К., Ломбардо В.Н.** Статика и динамика грунтовых плотин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 255 с.
8. **Лятхер В.М., Иващенко И.Н.** Сейсмостойкость грунтовых плотин. М.: Наука, 1986.
9. **Wieland M.** Earthquake safety of existing dams // Proceeding First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Geneva (Switzerland), 2006. P. 3–8.
10. **Gazetas G., Dakulas P.** Seismic analysis and design of rockfill dams: state-of-the-art // Soil Dynamics Earthquake Engineering. 1992. Vol. 11. P. 27–61.
11. **Russo G., Cecconi M., Vecchietti A., Pane V., Fiorino A., De Marco S.** Seismic Analyses of Menta Embankment Dam: Formulation and Synthesis of Results. // Numerical Analysis of Dams. Lecture Notes in Civil Engineering. Springer, Cham, 2020. Vol. 91. P. 399-417.
12. **Marsal R.J.** Large Scale Testing of Rockfill Materials // Journal of Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE. 1967. No.93(2). P. 27-43.
13. **Marachi N.D., Chan C.K., Seed H.B.** Evaluation of properties of rockfill materials // Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering. ASCE. 1972. No.98(1). P. 95-114.
14. **Gupta A.K.** Triaxial Behaviour of Rockfill Materials // Electronic Journal of Geotechnical Engineering - Ejge.com. Bund J. 2009. Vol. 14.

15. **Linero S., Palma C., Apablaza R.** Geotechnical characterization of waste material in very high dumps with large-scale triaxial testing // Proceedings of International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering. Perth, Australia. 2007. P.59-76.
16. **Chavez C., Alonso E.A.** Constitutive model for crushed granular aggregates which includes suction effects // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 2003. No.43(4). P. 215–227.
17. **Jia Y., Xu B., Chi S., Xiang B., Zhou Y.** Research on the Particle Breakage of Rockfill Materials during Triaxial Tests // International Journal of Geomechanics. 2017. No.17(10).
18. **Ишихара К.** Поведение грунтов при землетрясениях. СПб, 2006. 384 с.
19. **Глаговский В.Б., Гольдин А.Л., Радченко В.Г.** Исследования в области строительства плотин из грунтовых материалов // Гидротехническое строительство. 2011. № 9. С. 43-46.
20. **СП 58.13330.2019.** Гидротехнические сооружения. Основные положения. СНиП 33-01-2003. М.: Стандартинформ, 2020.
21. **СП 23.13330.2018.** Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85. М.: Стандартинформ, 2019.
22. **СП 39.13330.2012.** Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84*. М., 2012.
23. **СП 358.1325800.2017.** Сооружения гидротехнические. Правила проектирования и строительства в сейсмических районах. М.: Стандартинформ, 2018.
24. **Belkova I.N., Glagovsky V.B.** Numerical Analysis for Design Substantiation of the Rockfill Dam on Alluvial Foundation in the High Seismicity Zone // Proceedings of the 11th Int. Conf. on Computer Methods and Advances in Geomechanics. Turin, Italy. 2005. P. 209-216.
25. **Панов С.И., Буряков О.А.** Особенности оценки сейсмостойкости грунтовых плотин динамическим методом // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2012. Т. 265. С. 33-41.
26. **Глаговский В.Б., Финагенов О.М., Созинова Т.А.** Анализ устойчивости грунтовой плотины при сейсмическом воздействии и движении поездов по ее гребню // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2009. Т. 253. С. 43-48.
27. **Руководство пользователя PLAXIS 2D 2018.**
28. **Glagovsky V.B., Gibyanskaya E.D.** Seismic Analyses of Menta Embankment Dam// Numerical Analysis of Dams. Lecture Notes in Civil Engineering. Springer, Cham. 2020. Vol. 91. P. 501-511.
29. **Hall J.F., Chopra A. K.** Hydrodynamic effects in earthquake response of embankment dams // Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1982. Vol. 108(4). 591–597.
30. **Pelecinos L, Kontoe S, Zdravkovic L.** The effects of dam-reservoir interaction on the nonlinear seismic response of earth dams // Journal of Earthquake Engineering. 2018. <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1453409>
31. **Theme B.** Seismic Analysis of Menta Embankment Dam // Numerical Analysis of Dams. Lecture Notes in Civil Engineering. Springer, Cham. 2020. Vol 91. P. 419-641.
32. **Yu F, Kong X, Xu B.** Seismic response characteristics of earth and Rockfill Dams // Proceedings 15th world conference on earthquake engineering. Lisboa, Portugal. 2012.
33. **Swaisgood J.R.** Embankment dam deformations caused by earthquakes // Proceedings 7th Pacific conference on earthquake engineering. Christchurch, New Zealand. 2003.
34. **Swaisgood J.R.** Behavior of embankment dams during earthquake // Journal of Safety. ASDSO. 2014; 12(2):35–44.
35. **Idriss I.M.** Evaluating seismic risk in engineering practice // Proceedings of 11th ICSMFE. San Francisco. 1985. P. 255-320.

REFERENCES

1. Jansen RB (ed). Advanced dam engineering for design, construction, and rehabilitation. Van Nostrand Reinhold (ed), New York, 1988.
2. Goldin A.L., Rasskazov L.N. Design of soil dams. Moscow: Publishing house DIA, 2001. 384 p. (In Russ.).
3. Fell R., MacGregor P., Bell G., Foster M. Geotechnical Engineering of Dams, 2nd edn., London: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2015.
4. Foster M., Fell R., Spannagle M. The statistics of embankment dam failures and accidents // *Canadian Geotechnical Journal*. 2000;37(5):1000–1024.
5. Ishihara K. Performances of rockfill dams during recent large earthquakes. // *5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. San Diego (California), 2010. P. 1–11.
6. Krasnikov N.D. Seismic resistance of hydraulic structures made of soil materials. Moscow: Energoizdat, 1981. 240 p. (In Russ.).
7. Zaretsky Yu.K., Lombardo V.N. Statics and dynamics of earth dams. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 255 p. (In Russ.).
8. Lyather V.M., Ivashchenko I.N. Seismic resistance of earth dams. Moscow: Science, 1986. (In Russ.).
9. Wieland M. Earthquake safety of existing dams // *Proceeding First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. Geneva (Switzerland), 2006. P. 3–8.
10. Gazetas G., Dakulas P. Seismic analysis and design of rockfill dams: state-of-the-art. // *Soil Dynamics Earthquake Engineering*. 1992; 11: P.27–61.
11. Russo G., Cecconi M., Vecchiotti A., Pane V., Fiorino A., De Marco S. Seismic Analyses of Menta Embankment Dam: Formulation and Synthesis of Results // *Numerical Analysis of Dams. Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer, Cham, 2020. V. 91. P. 399-417.
12. Marsal R.J. Large Scale Testing of Rockfill Materials // *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*. ASCE. 1967. No.93(2). P. 27-43.
13. Marachi N.D., Chan C.K., Seed H.B. Evaluation of properties of rockfill materials // *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. ASCE. 1972. No.98(1). P. 95-114.
14. Gupta A.K. Triaxial Behaviour of Rockfill Materials // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering - Ejge.com. Bund J*. 2009. Vol. 14.
15. Linero S., Palma C., Apablaza R. Geotechnical characterization of waste material in very high dumps with large-scale triaxial testing. *Proceedings, International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*. Perth, Australia. 2007. P.59-76.
16. Chavez, C., Alonso, E.A. Constitutive model for crushed granular aggregates which includes suction effects // *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 2003;43(4):215–227.
17. Jia Y., Xu B., Chi S., Xiang B., Zhou Y. Research on the Particle Breakage of Rockfill Materials during Triaxial Tests // *International Journal of Geomechanics*. 2017. No.17(10).
18. Ishihara K. Behavior of soils during earthquakes. Saint-Petersburg, 2006. 384 p. (In Russ.).
19. Glagovsky V.B., Goldin A.L., Radchenko V.G. Research in the field of construction of dams from soil materials // *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo – Power Technology and Engineering*. 2011; 9: 43-46. (In Russ.).
20. SP 58.13330.2019. Hydraulic structures. Basic provisions. SNiP 33-01-2003. Moscow: Standartinform; 2020. (In Russ.).
21. SP 23.13330.2018. Foundations of hydraulic structures. Updated version of the SNiP 2.02.02-85. Moscow: Standartinform; 2019. (In Russ.).

22. SP 39.13330.2012. Dams made of soil materials. Updated version of the SNiP 2.06.05-84*. Moscow. 2012. (In Russ.).
23. SP 358.1325800.2017. Hydraulic structures. Rules for design and construction in seismic areas. Moscow: Standartinform; 2018. (In Russ.).
24. Belkova I.N., Glagovsky V.B. Numerical Analysis for Design Substantiation of the Rockfill Dam on Alluvial Foundation in the High Seismicity Zone. *Proceedings of the 11th Int. Conf. on Computer Methods and Advances in Geomechanics*. Turin. Italy. 2005. P. 209-216.
25. Panov S.I., Buryakov O.A. Features of assessing the seismic resistance of earth dams using the dynamic method // *Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2012;265:33-41. (In Russ.).
26. Glagovsky V.B., Finagenov O.M., Sozinova T.A. Analysis of the stability of an earth dam under seismic influence and train movement along its crest // *Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2009;253:43-48. (In Russ.).
27. User manual PLAXIS 2D 2018. (In Russ.).
28. Glagovsky V.B., Gibyanskaya E.D. Seismic Analyses of Menta Embankment Dam. In book: *Numerical Analysis of Dams. Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer. Cham. 2020. Vol 91. P. 501-511.
29. Hall J.F., Chopra, A.K. Hydrodynamic effects in earthquake response of embankment dams // *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 1982;108(4): 591–597.
30. Pelecanos L, Kontoe S, Zdravkovic L. The effects of dam-reservoir interaction on the nonlinear seismic response of earth dams. // *Journal of Earthquake Engineering*. 2018. <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1453409>
31. Theme B: Seismic Analysis of Menta Embankment Dam. In book: *Numerical Analysis of Dams. Lecture Notes in Civil Engineering*. Vol. 91. Springer. Cham. 2020. P. 419-641.
32. Yu F, Kong X, Xu B Seismic response characteristics of earth and Rockfill Dams // *Proceedings 15th world conference on earthquake engineering*. Lisboa, Portugal. 2012.
33. Swaisgood J.R. Embankment dam deformations caused by earthquakes // *Proceedings 7th Pacific conference on earthquake engineering*. Christchurch, New Zealand. 2003.
34. Swaisgood J.R (2014) Behavior of embankment dams during earthquake // *Journal of Safety*. ASDSO. 2014; 12(2):35–44.
35. Idriss IM (1985) Evaluating seismic risk in engineering practice // *Proceedings of 11th ICSMFE*. San Francisco. 1985. P. 255-320.

Информация об авторах

В.Б. Глаговский – доктор техн. наук, начальник отдела перспективных научно-исследовательских разработок;

Е.Д. Гибянская – главный специалист.

Information about the authors

V.B. Glagovsky – Dr. Sci. (Technology), Head of Department of Advanced Research and Development;

E.D. Gibyanskaya – Chief Specialist.

Статья поступила в редакцию 17.05.2023; одобрена после рецензирования 06.07.2023; принята к публикации 27.09.2023.

The article was submitted 17.05.2023; approved after reviewing 06.07.2023; accepted for publication 27.09.2023.

Научная статья
УДК 624.147

ЛЕДЯНЫЕ И ЛЬДОГРУНТОВЫЕ КОМПОЗИТЫ. ИССЛЕДОВАНИЯ ПОСЛЕДНИХ ЛЕТ

Николай Константинович Васильев

АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия, VasilivNK@vniig.ru

Аннотация. Приведен аналитический обзор публикаций, посвященных разработкам в области создания ледяных и льдогрунтовых композитов и их применению в арктических регионах. В последние годы растет число публикаций по данной теме. Это обусловлено интенсивным освоением арктических регионов, в которых рационально использовать лед как самый доступный материал в технологическом, экономическом и логистическом отношениях. Отмечены новые области применения ледяных и льдогрунтовых композитов.

Ключевые слова: обзор исследований, арктические регионы, ледяные и льдогрунтовые композиты, армирование льда, ледяные сооружения

Для цитирования: Васильев Н.К. Ледяные и льдогрунтовые композиты. Исследования последних лет // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 309. С. 56–69.

Original article

ICE AND ICE-SOIL COMPOSITES. RESEARCH IN RECENT YEARS

Nikolai K. Vasiliev

JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia, VasilivNK@vniig.ru

Abstract. An analytical review of publications devoted to developments in the field of creating ice and ice-soil composites and their application in the Arctic regions is given. In recent years, the number of publications on this topic has been growing. This is due to the intensive development of the Arctic regions, in which it is rational to use ice as the most accessible material in technological, economic and logistical terms. New areas of application of ice and ice-ground composites are noted.

Keywords: research review, arctic regions, ice and ice-ground composites, ice reinforcement, ice structures

For citation: Vasiliev N.K. Ice and ice-soil composites. Research in recent years. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;309:56-69. (In Russ.).

Введение

В арктических регионах лед – самый доступный материал, и наряду с экологической безопасностью он при низкой плотности обладает достаточно высокой прочностью. Таким образом, использование льда в качестве строительного материала для замены стали и бетона обеспечивает альтернативу

инженерной инфраструктуре и временным постройкам в Арктике. Однако имеются и существенные ограничения его использования из-за ползучести при температурах, близких к 0 °С, хрупкости при низких температурах и зависимости механических свойств от температуры с невозможностью его применения при положительных температурах. Чтобы сделать лед более пригодным для строительства, можно значительно повлиять на его механические характеристики созданием ледяных и льдогрунтовых композитов, тем самым эффективно снижая ползучесть и хрупкость льда, повышая его трещиностойкость, ударную вязкость, прочности на сжатие, изгиб, растяжение и термостойкость к воздействию положительных температур. Ледяные и льдогрунтовые композиты успешно применялись и применяются в гидротехническом строительстве в качестве водонепроницаемых и противофильтрационных элементов грунтовых плотин, в искусственных защитных ледовых дамбах, ледовых водосбросах и морских ледяных платформах для добычи углеводородов на арктическом шельфе [1–4].

В транспортном строительстве ледяные и льдогрунтовые композиты используются в ледовых переправах и зимниках, в качестве оснований взлетно-посадочных полос ледовых аэродромов, автомобильных и железных дорог и для укрепления нестабильных грунтовых оснований объектов магистральных трубопроводов. Известно применение ледяных композитов в ледяных гостиницах, куполах и дворцах для увеселений. Обзор публикаций по применению ледяных и льдогрунтовых композитов был представлен в 2015 г. в журналах «Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» [1] и «Cold Regions Science and Technology» [2].

Исследования в этой области продолжаются, за прошедшие 8 лет количество новых публикаций по этой теме исчисляется несколькими десятками, имеется тенденция увеличения их количества. Это обусловлено интенсивным освоением арктических регионов, в которых рационально использовать лед как самый доступный для этих регионов материал в технологическом, экономическом и логистическом отношениях. В настоящей статье приведен аналитический обзор публикаций с 2015 по 2023 гг., который будет полезен для распространения опыта использования ледяных и льдогрунтовых композитов в строительстве в арктических регионах.

В обзоре 2015 г. были рассмотрены три группы ледяных композитов:

(I) ледяные композиты, армированные геосинтетическими материалами;

(II) криогелевые льдогрунтовые композиты;

(III) пайкерит – композит, состоящий из древесных опилок (или какого-либо другого вида древесной массы, например, бумажной пульпы) и льда.

По всем трем группам исследования продолжены, и появились разработки по созданию ледяных композитов, не входящих в эти группы. Например, в публикации [5] предложены подходы к выбору химических соединений с позиций функциональности создаваемых композиционных материалов на основе льда, в публикации [6] даны результаты исследований по созданию ледяного композита с нанодисперсными частицами SiO₂. Шестикратное уменьшение размера частиц при их концентрации 10 вес. % приводит к упрочнению льда при испытании на одноосное сжатие в 2,5 раза при одновременном росте энергоемкости разрушения более чем на порядок величины. Кроме того, области применения ледяных и льдогрунтовых композитов постоянно расширяются. За последние годы появились

новые области их применения: для укрепления грунтовых оснований объектов магистральных трубопроводов [7], для укрытий средств ПВО [8] и для образовательных целей при строительстве ледовых сооружений [9].

Ледяные композиты, армированные геосинтетическими материалами

Применение геоматериалов позволяет сочетать методы армирования и методы ускоренного намораживания льда дождеванием. Исключительно важно, что обеспечивается безопасность эксплуатации ледяного покрова как несущего элемента для транспортных средств и для работ со льда. Из типичной диаграммы испытаний по определению прочностных характеристик, представленной в работе [10], а также на графике (рис. 1) видно, что в случае армированного геоматериалами льда максимальное напряжение не соответствует его разрушению и материал еще не исчерпал своего запаса несущей способности, в то время как для неармированного льда характерно хрупкое разрушение. Такие же различия в процессах разрушения неармированного и армированного льда характерны и для морского льда.

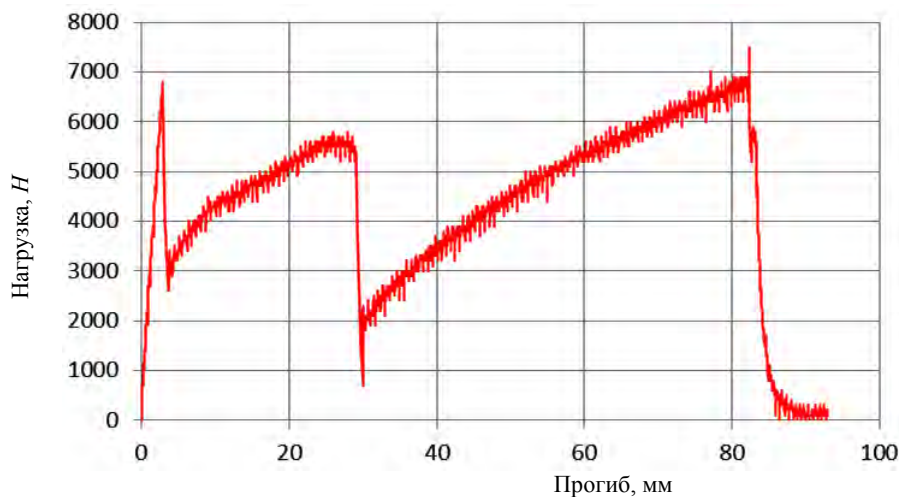


Рис. 1. Диаграмма «нагрузка – прогиб» для консоли из морского льда, армированного геосеткой «ГЕО СТ 100/100-25» из стекловолокна [10]

В 2019 г. Национальным исследовательским советом Канады опубликован доклад [11], посвященный применению и исследованию ледяных композитов первой группы – армированных геосинтетическими материалами. Подробно рассмотрены различные типы георешеток. Предоставлена информация о физико-механических характеристиках наиболее подходящих для армирования льда типов георешеток, выпускаемых промышленностью и имеющихся в продаже. Показано, что полимерные георешетки обладают желаемыми характеристиками, в том числе хорошей прочностью на растяжение и восстанавливаемостью после их использования. Особенно подчеркивается роль геоматериалов для повышения безопасности эксплуатации ледяных трасс посредством значительного повышения сопротивления распространению трещин.

Информация о наиболее подходящих для армирования льда типах геосинтетических материалов, выпускаемых отечественной промышленностью, дана в монографии по усилению ледовых переправ [12].

В Приамурском государственном университете им. Шолом-Алейхема проведены экспериментальные и численные исследования влияния армирования на несущую способность ледовых переправ [13]. Теми же авторами предложено [14] использование армирующих каркасов из полипропиленовых труб диаметром 32 мм, которое приводит к увеличению нагрузки, выдерживаемой ледовым покровом, в 3 раза. В работах [15, 16] представлены результаты расчетов напряженно-деформированного состояния ледяного покрова под нагрузкой от транспорта, выполненные в программном комплексе ANSYS на основе метода конечных элементов с учетом нелинейно-деформационной модели. Дана качественная и количественная оценка эффективности использования различных армирующих лед элементов: от единичных волокон до геосеток для повышения несущей способности ледяного покрова.

Одним из примеров применения геосинтетики (геосетки ГЕОН 40/40) для усиления ледяного покрова является ледовая переправа длиной 6,3 км в Иркутской области между населенными пунктами Игжей (Усть-Удинский район) и Балаганск (Балаганский район) [17]. Практическая реализация усиления ледового покрова армированием геосеткой выявила положительные моменты: простая технология укладки, повышенная безопасность эксплуатации трасс, возможность многократного применения геосетки в последующие зимы. Использование геоматериала может осуществляться повторно, так как после схода ледяного покрова геосетка не теряет своих свойств, а скатывается в рулоны и убирается на хранение, что приносит экономическую выгоду от строительства переправы в течение нескольких лет. Геосетка принимает на себя растягивающие напряжения, возникающие от температурных и транспортных нагрузок. Разработанный в [12] способ армирования ледового покрова в нижней зоне, названный способом «подныривания», проиллюстрирован на рис. 2. Способ «подныривания» наиболее приемлем при необходимости армирования ледовой переправы на водоемах, подъезд к которым в предзимний период осложнен или невозможен, например, автозимник проходит по заболоченной территории. В работе [18] даны рекомендации по использованию геосинтетических материалов ГК «МИАКОМ» для армирования ледовых переправ.

Отметим, что кроме геосинтетических материалов известен ряд решений [19], в которых для увеличения несущей способности в ледяной покров вмораживаются стальные элементы (например, стальные каркасы из армированной проволоки). Утверждается [19], что способ поверхностного армирования путем внедрения в относительно тонкий ледяной покров (30–40 см) стальной арматуры при определенных условиях перспективен. Наибольший эффект увеличения несущей способности наблюдался при испытании образцов, имеющих дополнительные продольные связи в боковой поверхности каркасов. Максимальная нагрузка, которую выдержали армированные стальной арматурой ледовые образцы, превысила нагрузку для неармированных ледовых балок более чем в четыре раза.

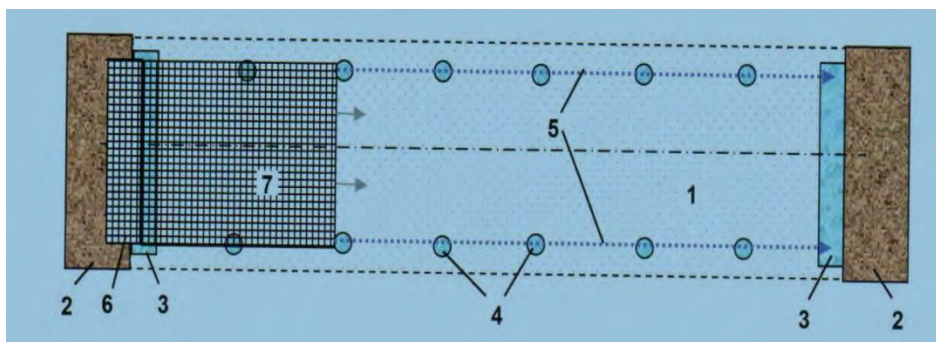


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая способ «подныривания» при армировании ледовой переправы [12]:

1 – естественный ледовый покров; 2 – берега; 3 – майны во льду для подачи и приема армирующего полотна; 4 – лунки для протягивания тросов; 5 – тросы подо льдом; 6 – рулон геосинтетического материала; 7 – полотно геосинтетики, протаскиваемое подо льдом

Криогелевые льдогрунтовые композиты

Разработки и исследования в области применения криогелевых льдогрунтовых композитов в последние годы продолжены, и в основном они касаются криогелей на основе поливинилового спирта (ПВС). Это связано не только с тем, что в состав композитов на основе ПВС входят экологически безопасные продукты, но и с тем, что варьируя характеристики ПВС (молекулярную массу, содержание остаточных ацетатных групп, концентрацию), состав растворителя, природу добавок, а также режим криогенной обработки (температуру и продолжительность замораживания и др.), можно в широких пределах регулировать физико-химические и реологические показатели криогелей, их макро- и микроструктуру. Криогелевый льдогрунтовый композит формируется после цикла замораживания-оттаивания в результате криотропного гелеобразования (рис. 3) [20].

С каждым циклом прочность криогеля увеличивается.

В настоящее время имеется опыт использования криогелевых композитов в нефтегазовом комплексе, однако опыт ограничен единичными случаями: в ПАО «Газпром» на Бованенковском месторождении в 2016 г. удачно проведен эксперимент по укреплению грунтов откосов и насыпей применением криогелей, кроме этого известна технология укрепления устьев скважин на территориях распространения многолетнемерзлых грунтов; разработан метод по использованию криогелей в околотрубном пространстве [21, 22]. Метод (рис. 4) включает нагнетание криогелеобразующего раствора ПВС в грунт основания дна траншеи трубопровода через скважины с двух сторон так, что под основанием траншеи образуется прочная опорная система в виде пространственной решетки из криогелевого льдогрунтового композита. Этим методом устраняются различные отклонения (изгиб трубы, перенапряжение), возникающие при эксплуатации трубопровода. Слой грунта, скрепленный криогелеобразующей композицией, защищает слои грунта от смещений относительно друг друга, а также служит гидроизоляцией в ходе сезонных колебаний температур.

В публикациях [23, 24] даются рекомендации по использованию криогелевых композитов на территории криолитозоны для широкого спек-

тра изменчивости мерзлотных инженерно-геологических условий: для скрепления пылеватых грунтов; для обеспечения устойчивости склонов, подверженных солифлюкционным процессам прибрежных территорий; в качестве противодиффузионных мероприятий как дополнения к малонадежным (подверженным прорывам и пр. нарушениям целостности) пленочным противодиффузионным устройствам.

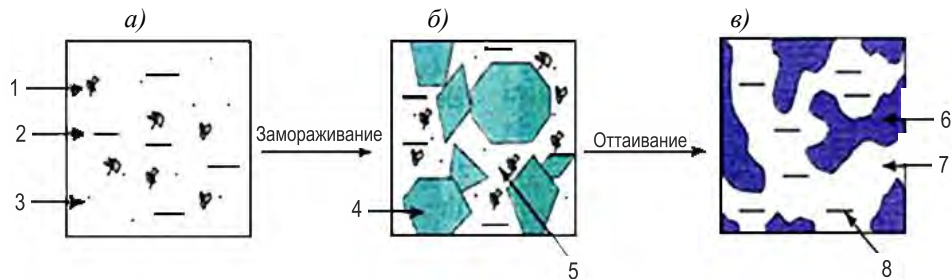


Рис. 3. Схема процесса криотропного гелеобразования:
a – исходная реакционная система; *б* – замороженная система;
в – система после оттаивания;

1 – высокомолекулярный гелеобразующий предшественник; 2 и 8 – растворитель;
 3 – низкомолекулярный гелеобразующий предшественник или разбавители; 4 – поликристаллы замёрзшего растворителя; 5 – незамерзшая жидкая микрофаза; 6 – полимерная сетка криогеля (стенки макропор); 7 – макропоры; 8 – оттаявший растворитель

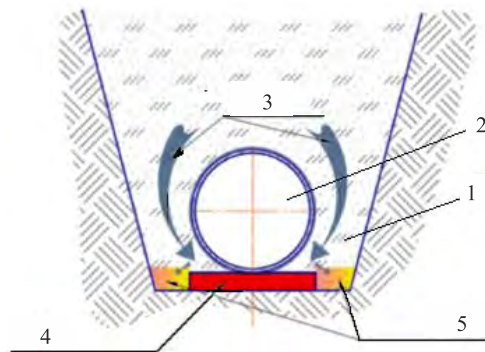


Рис. 4. Схема применения криогелевых грунтовых композитов для трубопроводов [21, 22]:
 1 – траншея; 2 – трубопровод; 3 – движение подземных вод;
 4 – криогелевый льдогрунтовый композит; 5 – линейные дренаи

Продолжены разработки по созданию криогелевых грунтовых композитов на основе водных растворов ПВС [23–25]. Эти композиты хорошо зарекомендовали себя в качестве водоупорных элементов грунтовых плотин как мерзлого, так и талого типов [3, 23]. В Забайкальском институте инженеров железнодорожного транспорта разработаны составы криогелевых грунтовых композитов, этот материал получил название «Криогелит» и согласно ТУ изготавливается из ПВС, сшивающего агента и минерального наполнителя (песчаного грунта, щебня, минералов). «Криогелит» предназначен для предотвращения и ликвидации дефектов земляного полотна, создания противодиффузионной защиты технических сооружений, предотвращения морозного пучения грунтов. «Криогелит» не представляет опасности для здоровья человека как источник химического загрязнения воздушной среды. Эффект от закрепления грунтов водным раствором поливинило-

вого спирта достигается за счет уникальных свойств раствора, который при инъектировании в грунтовой массив связывает грунт, а после цикла замораживания-оттаивания превращается в неподверженный влиянию воды криогель, который связывает грунт в единую эластичную систему [27].

Целесообразность использования криогелевых грунтовых композитов в водоупорных элементах грунтовых сооружений определяется следующим:

1. Обеспечиваются монолитность, высокие противофильтрационные и прочностные свойства фрагментов и конструкций грунтовых плотин при оттаивании и неблагоприятных внешних факторах: процессах замораживания-оттаивания и сейсмических воздействиях.

2. Строительные работы в ряде случаев можно вести круглогодично.

3. Исключается необходимость термовлажностной мелиорации местных строительных материалов.

4. При необходимости возможно обеспечить высокие теплоизоляционные свойства фрагментов и конструкций сооружений, например, ядра плотины, и таким образом уменьшить мощность системы замораживания.

В работе [28] проведены многочисленные неконсолидированно-недренированные (НН) испытания на трехосное сжатие образцов криогелевых грунтовых композитов с различным содержанием ПВС в водном растворе и установлено, что их прочностные характеристики, такие как угол внутреннего трения и удельного сцепления, существенно растут с ростом количества циклов замораживания-оттаивания по сравнению с неармированным грунтом, испытанным при тех же условиях. Исследованы криогелевые грунтовые композиты с варьированием содержания ПВС в водном растворе от 5 до 10 вес. %. В исследованных грунтовых композитах в качестве грунтов использованы песчанистые грунты.

В публикации [29] представлены результаты исследований по упрочнению соленого льда водорастворимым полимером ПВС. Испытаны на одноосное сжатие при скорости деформации $5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ 53 цилиндрических ($100 \times 250 \text{ мм}$) образца льдокомпозитов с различным содержанием ПВС. Часть полученных результатов показана на рис. 5. Зафиксировано повышение прочности на сжатие более чем в 3 раза и снижение ползучести в 1,9 раза по сравнению с неармированным соленым льдом.

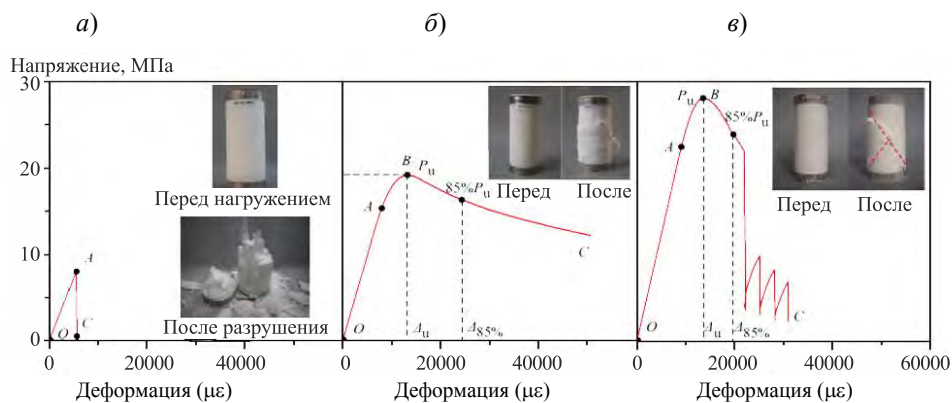


Рис. 5. Результаты испытаний на одноосное сжатие образцов соленого льда (а) и ледяных композитов, армированных различными марками ПВС: ПВС с весовым 3 %-м содержанием [24] PVA 2488 (б) и PVA 124 (в)

Пайкерит

Пайкерит обладает полезными для использования в качестве строительного материала свойствами, в частности, высокой термостойкостью, низкой скоростью таяния вследствие низкой теплопроводности, более высокой прочностью и вязкостью разрушения по сравнению со льдом. Использование пайкерита было предложено во время Второй мировой войны Джеффри Пайком в качестве материала для изготовления огромных, непотопляемых авианосцев (проект «Аввакум», который не был реализован). Подробный исторический экскурс по созданию авианосца из пайкерита опубликован сотрудниками Санкт-Петербургского горного университета в 2016 г. [30].

К настоящему времени накоплен опыт проектирования и строительства ледовых сооружений из пайкерита. Наиболее значительные проекты последних лет по созданию ледовых сооружений из пайкерита: модель Храма Святого Семейства, построенного в 2015 г. в Юука (Финляндия) в масштабе 1:5 с башней высотой 21 м, и возведенная в 2017–2018 гг. в Харбине (Китай) ледяная башня «Фламенко» (рис. 6) [31–33]. Высота ледяной башни «Фламенко» составила 30,5 м при толщине слоя армированного льда 7,0 см сверху и 40,0 см у основания. Такие параметры ледяного сооружения достигнуты за счет повышенной прочности льда, армированного целлюлозными волокнами. Рассмотренные выше ледовые сооружения созданы путем распыления при отрицательной температуре древесноволокнистой пульпы на надувную мембрану, удерживаемую канатной сеткой. Основы проектирования и строительства таких ледовых сооружений изложены в публикации [34], с историей развития и усовершенствования технологий по их возведению можно ознакомиться в [35].

Наряду с продолжением исследований свойств «традиционного» пайкерита (льда, армированного древесными опилками) проведены исследования по армированию льда другими производственными отходами переработки целлюлозы, например первичными целлюлозными волокнами [34, 36]. По сравнению с древесными опилками и другими производственными отходами переработки целлюлозы целлюлозные волокна имеют преимущества: низкая плотность, высокая прочность, простая технология добавления волокон в лед, красивый внешний вид и др. В последние годы широко используются армированные этими волокнами ледовые материалы в различных типах построенных во всем мире ледовых сооружений [31–35].

Армированный первичным целлюлозным волокном лед был исследован с помощью испытаний на одноосное сжатие [36] и на растяжение [37] для изучения влияния температуры от -20 до -5 °С и содержания волокна от 0 до 6 %. Результаты показывают, что прочность на одноосное сжатие армированного льда примерно в 4 раза выше, чем неармированного, а ползучесть намного ниже. Прочность на растяжение армированного льда при содержании волокон только 2 вес. % при температуре -5 °С в 1,75 раза выше и при температуре -20 °С в 2,54 раза выше, чем неармированного. По результатам испытаний были созданы статистические модели пиковой прочности, пиковой деформации и модуля упругости и приведены расчетные и экспериментальные зависимости прочностных характеристик

армированного льда от содержания волокон и температуры. Расчетные значения материалов предложены с анализом надежности [36].

Разработан льдокомпозит на основе натрий-карбоксиметилцеллюлозно-желатинового полиэлектролитного комплекса, обладающий более высокими прочностными характеристиками, чем «традиционный» пайкерит. В публикации [38] этот льдокомпозит назван «новым» пайкеритом.

Перспективны исследования по армированию льда базальтовыми волокнами [4, 39, 40]. Армирование льда базальтовыми волокнами и материалами на их основе (базальтовыми ровингами и др.) повышает прочностные характеристики испытанных образцов льдокомпозитов в 4–6 раз по сравнению с образцами пресноводного льда.



Рис. 6. Вид ледяной башни «Фламенко» в Харбине (Китай)

Заключение

В настоящей статье приведен аналитический обзор исследований, посвященных методам армирования льда и созданию ледяных и льдогрунтовых композитов за последние 8 лет, который будет полезен для распространения опыта их использования в строительстве в арктических регионах. Число публикаций растет, что отображает интерес и развитие этой области арктического материаловедения. Разрабатываются новые виды ледяных композитов и новые технологии их создания и технического применения в гидротехническом и транспортном строительстве. Области применения ледяных и льдогрунтовых композитов постоянно расширяются. За последние годы появились новые области их применения: для прокладки магистральных трубопроводов, укрытий средств ПВО и образовательных целей. Отметим, что распространение опыта их применения сдерживается, прежде всего, отсутствием нормативной базы, а не недостаточностью исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Васильев Н.К., Пронк А.Д.С.** Ледяные и льдогрунтовые композиты как строительные материалы в ледяных сооружениях // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2015. Т. 277. С. 35–45.

2. **Vasiliev N.K., Pronk A.D.C., Shatalina I.N., Janssen F., Houben R.** Review on the development of reinforced ice for use as a building material in cold regions // *Cold Regions Science and Technology*. 2015. Vol. 115. P. 56–63. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.03.006.
3. **Васильев Н.К., Глаговский В.Б., Иванов А.А., Шаталина И.Н.** Водопорные элементы грунтовых плотин в северной строительной-климатической зоне с использованием грунтово-криогелевых композитов // *Гидротехническое строительство*. 2013. № 11. С. 19–23.
4. **Бузник В.М., Черепанин Р.Н., Васильев Н.К.** Армируемые композиционные материалы с ледовой матрицей // *Арктическое материаловедение: состояние и развитие*. М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2021. 414 с.
5. **Гончарова Г.Ю. и др.** Новый метод упрочнения ледовых массивов, формируемых в условиях естественного холода // *Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева)*. 2021. Т. LXV. № 3. С. 33–41. DOI:10.6060/rcj.2021653.4.
6. **Головин Ю.И. и др.** Упрочнение поликристаллического льда наночастицами диоксида кремния // *Письма в журнал технической физики*. 2023. Т. 49. Вып. 11. С. 15. DOI: 10.21883/PJTF.2023.11.55532.19542.
7. **Алтунина Л.К. и др.** Применение криогелей для решения задач рационального природопользования и эксплуатации объектов магистральных трубопроводов в условиях Арктики // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2020. Т. 10. № 2. С. 173–185. DOI: 10.28999/2541-9595-2020-10-2-173-185.
8. **Слободчиков Н.А., Васильев Н.К., Моисеев В.И.** К вопросу об использовании облегченных сооружений из пайкерита для арктических районов России // *Системный анализ и логистика*. 2016. № 2 (13). С. 29–34.
9. **Pronk A., et al.** Success factors in the realization of large ice projects in education // *International Journal of Space Structures*. 2021. Vol. 36. Issue 1. P. 4–12. DOI: 10.1177/0956059921990996.
10. **Васильев Н.К. и др.** Испытания консолей армированного морского льда // *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. 2015. Т. 277. С. 46–55.
11. **Barrette P.D., Charlebois L., Butt B.** Reinforcement of ice covers for transportation: Material investigation and preliminary laboratory testing. Ottawa: National Research Council of Canada, 2019. 54 p. OCRE-TR-2018-031.2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.33892.40322.
12. **Якименко О.В., Сиротюк В.В.** Усиление ледовых переправ геосинтетическими материалами. Омск: СибАДИ, 2015. 169 с.
13. **Zemlyak V.L., Kozin V.M., Vasil'ev A.S., Ipatov K.I.** Experimental and numeral investigation of the influence of reinforcement on the load-carrying capacity of ice crossings // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2019. Vol. 56. No. 1. P. 37–43. DOI: 10.1007/s11204-019-09566-x.
14. **Васильев А.С., Земляк В.Л., Козин В.М.** Экспериментальное исследование поведения ледовых образцов при усилении трубчатыми стержнями из полипропилена // *Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики: материалы XI Всероссийской научной конференции с международным участием*. Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2022. С. 154–157.
15. **Ипатов К.И., Васильев А.С., Земляк В.Л., Лесков Е.В.** Несущая способность ледяного покрова при поверхностном армировании // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2019. № 3 (40). С. 3–12. DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-1>.
16. **Ипатов К.И., Козин В.М., Земляк В.Л.** Влияние схемы армирования на несущую способность ледовых переправ // *Полярная Механика*. 2016. № 3. С. 258–267.

17. **Карпунин А.А., Шабуров С.С.** Использование геосинтетических материалов при сооружении и эксплуатации ледовых переправ в Иркутской области // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. № 4 (19). С. 114–121. DOI: 10.21285/2227-2917-2016-4-114-121.
18. **Рекомендации** по использованию геосинтетических материалов ГК «МИАКОМ» для армирования ледовых переправ. URL: http://www.miakoming.ru/Info-Tech/Ledovie_perepravu.
19. **Козин В.М., Васильев А.С., Земляк В.Л., Ипатов К.И.** Исследование предельного состояния ледяного покрова в условиях чистого изгиба при усилении армирующими элементами // Вестник Томского государственного университета. Математика. Механика. 2019. № 81. С. 61–69. DOI: 10.17223/19988621/61/6.
20. **Lozinsky V.I., Okay O.** Basic principles of cryotropic gelation // Advances in Polymer Science. 2014. Vol. 263. P. 49–101.
21. **Дудникова С.А., Дудников В.Ю., Осадчая Г.Г.** К вопросу о создании грунтовых оснований с улучшенными гидроизоляционными, теплоизоляционными и механическими свойствами применением полимерных криогелей // Успехи современного естествознания. 2021. № 3. С. 43–48.
22. **Altunina L.K., et al.** Organizational-technical measures for cryogels application to increase the soil bearing capacity in the construction and operation of the pipeline transport facilities // Pipeline Science and Technology. 2019. Vol. 3. No. 2. P. 164–173. DOI: 10.28999/2541-9595-2019-9-2-164173.
23. **Алтунина Л.К. и др.** Применение криогелей при сооружении объектов нефтегазового сектора // Neftegaz.RU. 2021. № 12. С. 88–91.
24. **Алтунина Л.К. и др.** Криогели для защиты почв от дефляции и создание зеленого покрова // Северный регион: наука, образование, культура. 2015. № 2 (32). С. 216–221.
25. **Лозинский В.И., Васильев Н.К.** Ледовые композиты на основе криогелей // Арктическое материаловедение: состояние и развитие. М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2021. С. 312–316.
26. **Чернышева Е.А., Коновалова Н.А., Руш Е.А.** Новый экологически безопасный метод модификации грунтовых материалов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы четвертой всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2013. С. 231–235.
27. **Стоянович Г.М., Шипарев Р.Г.** Закрепление грунтов с помощью криотропного гелеобразования в дорожном строительстве // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2017. № 4. С. 759–767.
28. **Krainiukov A., Liu J., Kravchenko E., Chang D.** Performance of silty sand reinforced with aqueous solution of polyvinyl alcohol subjected to freeze-thaw cycles // Cold Regions Science and Technology. 2020. Vol. 174. P. 103054. DOI: 10.1016/j.coldregions.2020.103054.
29. **Jian Xie, Ming-Liang Yan, Jia-Bao Yan.** Experimental study on PVA reinforced salt-water ice under uniaxial-compression at arctic low temperatures // Cold Regions Science and Technology. 2023. Vol. 206. P. 103751. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103751.
30. **Ковалев О.В., Андреев М.Н., Райс В.В.** Пайкерит – льдокомпозит Второй мировой войны // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 1. С. 119–127. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-1-119-127.
31. **Pronk A., et al.** Design and construct of the 30.5 meter Flamenco Ice Tower // Conference: IASS Symposium. Boston: MIT, 2018.
32. **Pronk A. et al.** The 2017–18 design and construction of ice composite structures in Harbin // Structures. 2019. № 18. P. 117–127.
33. **Li Q., et al.** Structural performance under solar radiation of the 30.5-meter-high Flamenco Ice Tower // International Journal of Space Structures. 2021. Vol. 36. № 1. P. 48–66. DOI: 10.1177/09560599211005095.

34. **Yue Wu, et al.** Design, construction and monitoring of an ice composite shell structures // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 106. № 12. P. 102862. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102862.
35. **Pronk A., Vasiliev N., Belis J.** Historical development of structural ice // *Structures and Architecture*. 2016. P. 339–347. DOI: 10.1201/b20891-45.
36. **Wu Y., Lou X., Liu X., Pronk A.** The property of fiber reinforced ice under uniaxial compression // *Materials and Structures*. 2020. Vol. 53. № 2. DOI: 10.1617/s11527-020-01463-2.
37. **Lou X., Wu Y., Huang J., Chen Z.** The tensile mechanical properties and constitutive model of plain ice and fiber-reinforced ice for construction // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 394. P. 132050.
38. **Li J.H., Wei Z., Wu Ch.** Preparation and properties of novel building materials at low temperature // *Materials & Design*. 2015. Vol. 67. P. 464–468. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.10.040.
39. **Buznik V.M., et al.** Strengthening of ice with basalt materials // *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 196. P. 103490. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103490.
40. **Syromyatnikova A.S., Bolshakov A.M., Kychkin A.K., Alekseeva A.V.** Reinforcement of Composites Based on Fresh Ice with Natural Fillers // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2020. Vol. 11. № 4. P. 955–957. DOI: 10.1134/S2075113320040371.

REFERENCES

1. Valilyev N.K., Pronk A.D.S. Ice and ice-soil composites as construction materials in ice structures. *Izvestiya VNIIG im. B. E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2015;277:35-45. (In Russ).
2. Vasiliev N.K., Pronk A.D.C., Shatalina I.N., Janssen F., Houben R. Review on the development of reinforced ice for use as a building material in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2015;115:56-63. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.03.006.
3. Vasiliev N.K., Glagovsky V.B., Ivanov A.A., Shatalina I.N. Water-resistant elements of soil dams in the northern construction and climatic zone using soil-cryogel composites. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo – Power Technology and Engineering*. 2013;11:19-23. (In Russ.).
4. Buznik V.M., Cherepanin R.N., Vasiliev N.K. Reinforced composite materials with an ice matrix. *Arctic Materials science: state and development*. Moscow: Gubkin Russian State Oil and Gas University; 2021. 414 p. (In Russ.).
5. Goncharova G.Yu., et al. A new method of an ice blocks formed under a natural cooling condition strengthening. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*. 2021;65(3):33-41. DOI:10.6060/rcj.2021653.4. (In Russ.).
6. Golovin Yu.I., et al. Hardening of polycrystalline ice with silicon dioxide nanoparticles. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Technical Physics Letters*. 2023;49(11):15. DOI: 10.21883/PJTF.2023.11.55532.19542. (In Russ.).
7. Altunina L.K., et al. Cryogels as a solution to the issues of environmental management and trunk pipeline operation in arctic. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov –Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2020;10(2):173-185. DOI: 10.28999/2541-9595-2020-10-2-173-185. (In Russ.).
8. Slobodchikov N.A., Vasiliev N.K., Moiseev V.I. On the use of lightweight structures made of pikerite for the Arctic regions of Russia. *Sistemny analiz i logistika – System analysis and logistics*. 2016;2(13):29-34. (In Russ.).
9. Pronk A., et al. Success factors in the realization of large ice projects in education. *International Journal of Space Structures*. 2021;36(1):4-12. DOI: 10.1177/0956059921990996.

10. Vasilyev N.K., et al. Testing of cantilevers of reinforced sea ice. *Izvestiya VNIIG im. B. E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2015;277:46-55. (In Russ).
11. Barrette P.D., Charlebois L., Butt B. Reinforcement of ice covers for transportation: Material investigation and preliminary laboratory testing. Ottawa: National Research Council of Canada; 2019. 54 p. OCRE-TR-2018-031.2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.33892.40322.
12. Yakimenko O.V., Sirotyuk V.V. Strengthening of ice crossings with geosynthetic materials. Omsk: SibADI; 2015. 169 p. (In Russ).
13. Zemlyak V.L., Kozin V.M., Vasil'ev A.S., Ipatov K.I. Experimental and numerical investigation of the influence of reinforcement on the load-carrying capacity of ice crossings. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2019;56(1):37-43. DOI: 10.1007/s11204-019-09566-x.
14. Vasil'ev A., Zemlyak V., Kozin V. Experimental study of the behavior of reinforced ice covers with polypropylene tubular rod. *Actual problems of modern continuum mechanics and celestial mechanics: materials of the XI All-Russian Scientific Conference with international participation*. Tomsk: National Research Tomsk State University; 2022. P. 154–157. (In Russ).
15. Ipatov K., Vasilyev A., Zemlyak V., Leskov E. Carrying capacities of the ice cover with surface reinforcement. *FEFU: School of engineering bulletin*. 2019;3(40):3-12. (In Russ). DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-1>. (In Russ).
16. Ipatov K., Kozin V., Zemlyak V. The influence of reinforcement design on the bearing capacity of ice bridges. *Polar mechanics*. 2016;3:258-267. (In Russ).
17. Karpunin A.A., Shaburov S.S. Use of geosynthetic materials during the construction and exploitation of ice bridges of Irkutsk region. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost – Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2016;4(19):114-121. DOI: 10.21285/2227-2917-2016-4-114-121. (In Russ).
18. Recommendations on the use of geosynthetic materials of MIAKOM Group for reinforcement of ice crossings. URL: http://www.miakoming.ru/Info-Tech/Ledovie_perepravu. (In Russ).
19. Kozin V.M., Vasil'ev A.S., Zemlyak V.L., Ipatov K.I. Investigation of the limit state of ice cover under conditions of pure bending when using reinforcing elements. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2019;61:61-69. DOI: 10.17223/19988621/61/6. (In Russ).
20. Lozinsky V.I., Okay O. Basic principles of cryotropic gelation. *Advances in Polymer Science*. 2014;263:49-101.
21. Dudnikova S.A., Dudnikov V.Yu., Osadchaya G.G. To the question of creation of soil bases with improved waterproofing, thermal insulating and mechanical properties by application of polymer cryogels. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya – Advances in current natural sciences*. 2021; 3:43-48. (In Russ).
22. Altunina L.K., et al. Organizational-technical measures for cryogels application to increase the soil bearing capacity in the construction and operation of the pipeline transport facilities. *Pipeline Science and Technology*. 2019;3(2):164-173. DOI: 10.28999/2541-9595-2019-9-2-164173.
23. Altunina L.K., et al. The use of cryogels in the construction of oil and gas sector facilities. *Neftegaz.RU*. 2021;12:88-91. (In Russ).
24. Altunina L.K., et al. Cryogels for soil protection from deflation and greening. *Severny region: nauka, obrazovanie, cultura*. 2015; 2(32):216-221. (In Russ).
25. Lozinsky V.I., Vasiliev N.K. Ice composites based on cryogels. *Arctic Materials science: state and development*. Moscow: Gubkin Russian State Oil and Gas University; 2021. P. 312-316. (In Russ.).
26. Chernysheva E.A., Konovalova N.A., Rush E.A. A new environmentally safe method of modifying soil materials // Transport infrastructure of the Siberian region:

materials of the fourth All-Russian scientific and practical conference with international participation. Irkutsk: Irkutsk State Transport University, 2013. P. 231–235. (In Russ.).

27. Stoyanovich G.M., Shiparev R.G. Soil stabilization by use of cryotropic gelation in roadbuilding. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2017;4:759-767. (In Russ.).

28. Krainiukov A., Liu J., Kravchenko E., Chang D. Performance of silty sand reinforced with aqueous solution of polyvinyl alcohol subjected to freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*. 2020;174:103054. DOI: 10.1016/j.coldregions.2020.103054.

29. Jian Xie, Ming-Liang Yan, Jia-Bao Yan. Experimental study on PVA reinforced salt-water ice under uniaxial-compression at arctic low temperatures. *Cold Regions Science and Technology*. 2023;206:103751. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103751.

30. Kovalev O.V., Andreev M.N., Rice V.V. Pykrete is the frozen composite material of the World War II. *Led i sneg – Ice and Snow*. 2016;56(1):119-127. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-1-119-127. (In Russ.).

31. Pronk A., et al. Design and construct of the 30.5 meter Flamenco Ice Tower. *Conference: IASS Symposium*. Boston: MIT; 2018.

32. Pronk A. et al. The 2017–18 design and construction of ice composite structures in Harbin. *Structures*. 2019;18:117-127.

33. Li Q., et al. Structural performance under solar radiation of the 30.5-meter-high Flamenco Ice Tower. *International Journal of Space Structures*. 2021;36(1):48-66. DOI: 10.1177/09560599211005095.

34. Wu Y., et al. Design, construction and monitoring of an ice composite shell structures. *Automation in Construction*. 2019;106(12):102862. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102862.

35. Pronk A., Vasiliev N., Belis J. Historical development of structural ice. *Structures and Architecture*. 2016. P. 339-347. DOI: 10.1201/b20891-45.

36. Wu Y., Lou X., Liu X., Pronk A. The property of fiber reinforced ice under uniaxial compression. *Materials and Structures*. 2020;53(2). DOI: 10.1617/s11527-020-01463-2.

37. Lou X., Wu Y., Huang J., Chen Z. The tensile mechanical properties and constitutive model of plain ice and fiber-reinforced ice for construction. *Construction and Building Materials*. 2023;394:132050.

38. Li J.H., Wei Z., Wu Ch. Preparation and properties of novel building materials at low temperature. *Materials & Design*. 2015;67:464-468. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.10.040.

39. Buznik V.M., et al. Strengthening of ice with basalt materials. *Cold Regions Science and Technology*. 2022;196:103490. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103490.

40. Syromyatnikova A.S., Bolshakov A.M., Kychkin A.K., Alekseeva A.V. Reinforcement of Composites Based on Fresh Ice with Natural Filers. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2020;11(4):955-957. DOI: 10.1134/S2075113320040371.

Информация об авторе

Н.К. Васильев – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник.

Information about the author

N.K. Vasiliev – Cand. Sci. (Techn.), Lead Researcher.

Статья поступила в редакцию 17.05.2023; одобрена после рецензирования 27.06.2023; принята к публикации 27.09.2023.

The article was submitted 17.05.2023; approved after reviewing 27.06.2023; accepted for publication 27.09.2023.

Научная статья
УДК 627.88

АКТУАЛЬНОСТЬ ЗАЩИТЫ БЕТОНА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ОТ ОБЛЕДЕНЕНИЙ

Георгий Владимирович Охупкин¹, Наталья Симовна Бакановичус²,
Анна Алексеевна Лялина³

^{1,2,3} АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия

¹ okhapkingv@vniig.ru, georgii@okhapkin.net

² BakanovichusNS@vniig.ru

³ LyalinaAA@vniig.ru

Аннотация. В статье рассмотрены подходы к защите бетонных и железобетонных конструкций при жизненном цикле гидротехнических сооружений. Выделены основные причины разрушений бетонных и железобетонных конструкций. Определены принципы и методы защиты при восстановлении бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений. Приведена информация по защите бетона от обледенений.

Ключевые слова: защита бетона, защитные покрытия, принципы и методы защиты, жизненный цикл, обледенение

Для цитирования: Охупкин Г.В., Бакановичус Н.С., Лялина А.А. Актуальность защиты бетона гидротехнических сооружений от обледенений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 309. С. 70–78.

Original article

RELEVANCE OF PROTECTING CONCRETE OF HYDRAULIC STRUCTURES FROM ICING

Georgy V. Okhapkin¹, Natalia S. Bakanovichus², Anna A. Lyalina³

^{1,2,3} JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia

¹ okhapkingv@vniig.ru, georgii@okhapkin.net

² BakanovichusNS@vniig.ru

³ LyalinaAA@vniig.ru

Abstract. The article discusses approaches to protection of concrete and reinforced concrete structures during the life cycle of hydro-technical facilities. The main causes of destruction of concrete and reinforced concrete structures are identified. The principles and methods of protection during the restoration of concrete and reinforced concrete structures of hydro-technical facilities are determined. Provides information on the protection of concrete from icing.

Keywords: protection of concrete, protective coatings, principles and methods of protection, life cycle, icing

For citation: Okhapkin G.V., Bakanovichus N.S., Lyalina A.A. Relevance of protecting concrete of hydraulic structures from icing. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;309:70-78. (In Russ.).

© Охупкин Г.В., Бакановичус Н.С., Лялина А.А., 2023

Объекты гидротехники являются одними из важнейших в топливно-энергетических и транспортных комплексах стран. В связи с чем, обеспечение надёжной и безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС) является одной из важнейших стратегических задач для функционирования топливно-энергетических комплексов Российской Федерации [1, 2].

В течение длительного периода эксплуатации конструкции ГТС подвергаются воздействию комплекса нагрузок (эксплуатационные, климатические, гидростатические, сейсмические, нагрузки от оборудования и т. д.) в сочетании с физическим и моральным износом, что способствует накоплению прогрессирующих разрушений, особенно в зонах наиболее интенсивных воздействий, которые могут способствовать разрушению защитного слоя или снижению пассивирующих свойств бетона по отношению к арматуре [2].

Долговечность эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций, работающих в условиях переменного уровня воды и активного атмосферного воздействия, особенно в суровых климатических условиях, является одним из актуальных вопросов для обеспечения надёжности и безопасности ГТС при жизненном цикле.

Надёжность и безопасность ГТС неразрывно связаны с несущей способностью конструкций, то есть способностью выдерживать эксплуатационные нагрузки и воздействия. Для обеспечения несущей способности бетонные и железобетонные конструкции должны удовлетворять расчётным требованиям по предельным состояниям первой и второй группы. Допустимое раскрытие трещин в зависимости от класса сооружения и типов конструкций составляет 0 – 0,5 мм [3, 4].

В правильно спроектированных и построенных железобетонных конструкциях защитный слой бетона обеспечивает сохранение арматуры от процессов коррозии в нормальных условиях воздействий эксплуатационной среды [5–7]. Регламентирующими параметрами для обеспечения защиты арматуры от коррозии являются толщина защитного слоя, эксплуатационные характеристики бетона и допустимое раскрытие трещин. В связи с чем, недопустимое раскрытие трещин в бетоне, увеличивающее риск проникновения в конструкцию влаги и газов, способствует развитию деструктивных процессов [8].

К одной из наиболее распространённых причин разрушения железобетона относится карбонатная коррозия (карбонизация), которая приводит к снижению пассивирующих свойств бетона по отношению к арматуре. Известь, образующаяся при гидратации цемента, создает в бетоне щелочную среду, с высоким показателем pH (12–14). Пористая структура бетона способствует впитыванию углекислого газа, кислорода и влаги, присутствующих в окружающей среде, приводящих к нейтрализации извести с образованием карбоната кальция. Стоит отметить, что данные процессы не оказывают значительного влияния на изменение прочностных характеристик бетона, но снижают показатель pH среды до значений, меньших 8,5, что создает благоприятные условия для коррозии арматуры. Продукты коррозии, образующиеся при окислении арматуры, увеличивают ее объем приблизительно на 25 %. Это приводит к трещинообразованию и разрушению защитного слоя бетона, дальнейшему стремительному развитию кор-

розии арматуры и, как следствие, разрушению объёмной структуры бетона [9, 10].

Другой причиной разрушения бетона конструкций ГТС являются процессы циклического замораживания–оттаивания и увлажнения–высушивания в зимний период. Как известно, коэффициенты линейного термического расширения льда и бетона различаются более чем в 5 раз, а при замораживании вода увеличивается в объёме на 9 % [11–14]. В процессе формирования ледяной корки на поверхности конструкций ГТС образуется прочный адгезионный слой между бетонным основанием и льдом [15]. Чем выше слой ледяной корки, тем больше сила, способствующая развитию трещин бетонного поверхностного слоя, спровоцированная растрескиванием ледяного покрытия, ввиду высокой прочности сцепления контактной зоны лёд–бетон [16, 17]. В свою очередь, вода в трещинах при замораживании создаёт в бетоне растягивающие напряжения, которые будут значительно превосходить прочность бетона на растяжение [11–14]. В совокупности данные процессы приводят к разрушению защитного слоя бетона.

В связи с вышеизложенным, актуальными являются вопросы защиты бетонных и железобетонных конструкций от обледенения при жизненном цикле ГТС.

В общих случаях при восстановлении бетона конструкций используются нормативные документы, посвящённые материалам и системам для защиты и ремонта бетонных конструкций, например: для Российской Федерации [5, 18], для Европейского Союза [7, 20], для Республики Беларусь [6, 19]. Для защиты бетона конструкций нашли применение следующие принципы и методы:

принцип 1 – защита от проникания и принцип 2 – регулирование влагосодержания, включающие гидрофобизацию, пропитку, покрытие;

принцип 5 – повышение физической стойкости и принцип 6 – повышение стойкости к химикатам, включающие пропитку, покрытие, добавление раствора или бетона.

Гидрофобизация – это обработка бетона путем создания водоотталкивающей поверхности, при этом поры и капилляры остаются незаполненными, пленка на поверхности бетона не образуется, внешний вид меняется мало или не меняется вообще. Активными соединениями могут быть, например, силаны и силоксаны [18]. Пропитка – это обработка бетона для уменьшения поверхностной пористости и для упрочнения поверхности, поры и капилляры заполняются частично или полностью. Обработка обычно приводит к образованию на поверхности бетона тонкой прерывистой пленки. Вяжущими могут быть, например, органические полимеры [18]. Покрытие – это обработка путем создания на поверхности бетона сплошного защитного слоя. Толщина защитного покрытия обычно составляет от 0,1 до 5,0 мм. В особых случаях может потребоваться толщина более 5 мм. Вяжущими могут быть, например, органические полимеры, органические полимеры с цементом в качестве заполнителя или с гидравлическим цементом, модифицированным дисперсией полимера [18]. Добавление раствора или бетона, увеличение защитного слоя за счет дополнительного раствора или бетона, замена загрязненного или карбонизированного бетона, как правило, аналогичны восстановлению объёмной структуры бетона

[2] в соответствии с принципом 3 [21–23], включая нанесение вручную растворной смеси, укладку (заливку) бетонной смеси, набрызг бетонной или растворной смеси [24].

Все средства защиты от обледенения (СЗО) условно можно разделить на две группы:

активные, предупреждающие обледенение или периодически удаляющие образовавшийся лёд, например, механические, физико-химические и тепловые;

пассивные – заблаговременное прогнозирование, оповещение об обледенении, проведение организационных мероприятий, введение ограничений по эксплуатации объектов в районах, подверженных обледенению.

Принцип действия физико-химических СЗО основан на использовании составов, растворимых в воде, в результате чего на поверхности защищаемой конструкции образуется водный раствор, не замерзающий при температуре обледенения. Исключение составляют полимерные антиобледенительные покрытия, которые также относят к физико-химическим средствам защиты от обледенения. В связи с чем, физико-химические СЗО укрупнённо можно подразделить на такие основные подгруппы:

системы, основанные на принципе использования теплоты химических процессов;

системы с образованием на защищаемой поверхности растворов, имеющих более низкую температуру замерзания, чем температура воздуха при обледенении;

системы, основанные на протекании физико-химических процессов, в результате которых уменьшается свободная поверхностная энергия защищаемой поверхности. К таким системам относятся гидрофобные покрытия, уменьшающие адгезию льда к защищаемым поверхностям.

Придание покрытиям антиобледенительных свойств с низкой адгезионной прочностью контактной зоны лёд–покрытие может быть достигнуто либо путем введения в состав покрытия наполнителей-антифризов, либо с использованием гидрофобных пленкообразователей с низкой поверхностной энергией. Покрытия, содержащие твердые (солевые) антифризы (хлориды аммония, натрия, магния, кальция) или жидкие (алкиленгликоли С2–С6) антифризы, основаны на применении гидрофильных пленкообразователей (полимеры, сополимеры винилацетата, эфиры целлюлозы, полиакриловая кислота). Содержание антифризов в композициях должно быть максимальным, но при условии получения покрытий с требуемыми механическими характеристиками. В зависимости от природы антифриза и его содержания температура замерзания может очень значительно понижаться (на десятки градусов Цельсия). Стоит отметить, что покрытия, получаемые из пленкообразователей с низкой поверхностной энергией, не препятствуют, в отличие от антифризов, ледообразованию, но прочность образующегося адгезионного контакта существенно снижается.

Анализ информации в области антиобледенительных покрытий отечественного и зарубежного производства, с учетом имеющихся данных в области борьбы с обледенением конструкций, показал, что в настоящее время для защиты поверхности применяют антиадгезионные покрытия на основе различных пленкообразующих материалов, например: органосиликатные, фторопластовые, эпоксидные, силикон-эпоксидные и пр.

Органосиликатные композиции содержат матрицу из разветвленных полиорганосилоксанов и наполнители-силикаты или оксиды металлов. Силикатные компоненты, главным образом, мусковит, тальк, хризотил, оксиды Cr (III), Ti (IV), Fe (III) и др., полиорганосилоксаны могут быть модифицированы органосиликатными полимерами, например, полиэфирными смолами. В качестве силикон-эпоксидных покрытий с антиобледенительными свойствами представлены, в частности, многослойные противообледенительные системы, состоящие из одного или нескольких слоев грунтового покрытия, обеспечивающего высокую адгезионную прочность покрытия к защищаемой поверхности, и одного или нескольких слоев финишного пленкообразующего покрытия, которое обеспечивает снижение адгезионной прочности со льдом. В качестве наиболее гидрофобных пленкообразователей и покрытий на их основе, обладающих максимальным углом контакта, наибольший интерес представляют фторполимеры, получаемые сополимеризацией фторолефинов с виниловыми эфирами. Эти материалы обладают высокой устойчивостью к УФ-излучению и химстойкостью. Долговечность таких покрытий в экстремальных условиях эксплуатации ориентировочно составляет 10–25 лет, в обычных условиях – 30 лет. Сочетая характеристики фторпластов и полиуретана, покрытия обладают высокими гидрофобными свойствами, за счет чего снижается адсорбционное взаимодействие на первой стадии контакта с агрессивной средой, что замедляет процессы старения покрытия. Учитывая большую величину угла контакта покрытий на основе фторполимеров, эти материалы стали использовать в качестве противообледенительных, антивандальных покрытий и покрытий с эффектом грязеотталкивания [25, 26].

Для определения эффективности применения антиобледенительных покрытий на бетонных и железобетонных конструкциях ГТС выполнен комплекс лабораторных исследований по определению показателей адгезии контактной зоны покрытие–бетон на отрыв (A_0) и сдвиг (A_C), некоторые результаты которых приведены в таблице.

Значения показателей адгезии некоторых исследуемых материалов

Система покрытия	Показатель адгезии контактной зоны			
	A_0 , МПа	$A_{0\text{макс}}$, МПа	A_C , МПа	$A_{C\text{макс}}$, МПа
Однослойное покрытие (ОС-56-22)	0,069 при $t = -10$ °С	0–0,058 при $t = 0, 5, 15, 20, 25, 30$ °С	0,319 при $t = -10$ °С	0–0,269 при $t = 0, 5, 15, 20, 25, 30$ °С
Двухслойное покрытие (грунтовое основание EP23-SiI, финишное покрытие EP-ZP)	0,188 при $t = -15$ °С	0–0,179 при $t = 0, 5, 10, 20, 25, 30$ °С	0,628 при $t = -10$ °С	0–0,564 при $t = 0, 5, 15, 20, 25, 30$ °С

Лабораторные исследования по оценке влияния химического состава воды на показатели адгезии контактной зоны лёд–покрытие свидетельствует об отсутствии определяющего влияния химического состава воды на значение адгезионной прочности. Так, для дистиллированной воды и воды из р. Нерль, р. Волги и р. Невы значения средней адгезионной прочности отличаются не более чем на 10 % и имеют незначительные (также в пределах 10 %) расхождения со значениями, полученными в ходе лабораторных исследований с применением дистиллированной воды. Полученные результаты дают основание полагать, что определяющее влияние химического состава воды на адгезионную прочность контактной зоны лёд–покрытие отсутствует, что, вероятно, обусловлено процессами, происходящими при замерзании воды (её вымораживании).

Анализ результатов исследований по определению адгезионной прочности зоны контакта лёд–покрытие на отрыв и сдвиг льда в широком диапазоне рассматриваемых отрицательных температур свидетельствует о достаточно высокой эффективности всех исследованных антиобледенительных покрытий. Адгезионная прочность контактной зоны лёд–покрытие в сравнении с контактной зоной лёд–бетон, в зависимости от типа покрытия и температуры, снижается до 10 раз.

Заключение

1. Обледенение конструкций ГТС является предпосылкой к трещинообразованию в защитном слое бетона и, как следствие, разрушению объёмной структуры бетона.

2. Нанесение защитных антиобледенительных покрытий может значительно снизить предпосылки к разрушению бетонных и железобетонных конструкций при эксплуатации ГТС.

3. Своевременные профилактические мероприятия по защите бетона от обледенения конструкций ГТС являются целесообразными, так как позволяют минимизировать причины разрушения защитного слоя бетона, сохранять несущую способность конструкций, обеспечивать надёжную и безопасную эксплуатацию при жизненном цикле ГТС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Охапкин Г.В., Василевская Л.С.** Обеспечение сохранности и восстановление объёмной структуры бетона с учетом оптимизации затрат на эксплуатацию в течение жизненного цикла гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2022. № 6. С. 34–39.

2. **Охапкин Г.В.** Подходы к цифровой трансформации выбора технических решений по восстановлению объёмной структуры бетона гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2023. № 4. С. 13–18.

3. **СП 41.13330.2012.** Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87 (с Изменением № 1). М., 2012.

4. **СП 28.13330.2012.** Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85 (с Изменениями № 1, 2).

5. **ГОСТ 32016-2012.** Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2013.
6. **СТБ EN 1504-9-2019.** Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Определения, требования, контроль качества и оценка соответствия. Часть 9. Общие правила по применению материалов и систем. Минск: Госстандарт, 2020.
7. **DIN EN 1504-9:2008.** General principles for the use of products and systems. German version EN 1504-9:2008. 2008.
8. **Джирма С.А.** Трещины в конструкциях из бетона и железобетона. Технология выполнения работ по устранению трещин // Наукові записки. 2010. Вып. 10, ч. III. С. 195–200.
9. **Москвин В.М.** Коррозия бетона. М.: Госстройиздат, 1952. 344 с.
10. **Степанова В.Ф.** Долговечность бетона. М., 2014. 126 с.
11. **Шилин А.А.** Ремонт железобетонных конструкций. М.: Горная книга, 2010. 519 с.
12. **Охапкин Г.В.** Обоснование рациональных технических решений по ремонту площадных разрушений бетона гидротехнических сооружений в зоне переменного уровня: автореферат дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2019. 124 с.
13. **Гныря А.И., Коробков С.В.** Технология бетонных работ в зимних условиях. Томск: Издательство ТГАСУ, 2011.
14. **Давиденко В.М., Охапкин Г.В., Бибина О.Е.** Современные методы подготовки к ремонту поверхностей бетонных конструкций гидротехнических сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2018. Т. 289. С. 52–58.
15. **Кожухова М.И., Строкова В.В.** Комплексное силиконовое покрытие для супергидрофобизации бетонных поверхностей // Строительные материалы. 2014. № 3. С. 26–30.
16. **Valenza J.J., Scherer G.W.** Mechanisms of salt scaling // Materials and Structures. 2005. № 38. С. 479–488.
17. **Valenza J.J., Scherer G.W.** A review of salt scaling: I. Phenomenology // Cement and Concrete Research. 2007. № 37. P. 1007–1021.
18. **ГОСТ 32017-2012.** Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Требования к системам защиты бетона при ремонте. М.: Стандартинформ, 2013.
19. **СТБ EN 1504-2-2009.** Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Определения, требования, контроль качества и оценка соответствия. Часть 2. Системы защитных покрытий для бетона. Минск: Госстандарт, 2009.
20. **DIN EN 1504-2:2005.** Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Surface protection systems for concrete. German version EN 1504-2:2005. 2005.
21. **ГОСТ Р 56378-2015.** Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Требования к ремонтным смесям и адгезионным соединениям контактной зоны при восстановлении конструкций. М.: Стандартинформ, 2015.
22. **СТБ EN 1504-3-2009.** Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Определения, требования, контроль качества и оценка соответствия. Часть 3. Ремонт несущих конструкций зданий и ремонт изменения несущих конструкций. – Минск: Госстандарт, 2009.
23. **DIN EN 1504-3:2006.** Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Structural and non-structural repair. German version EN 1504-3:2006. 2006.
24. **Охапкин Г.В., Василевская Л.С.** Анализ подходов к выбору способов нанесения или укладки ремонтных материалов при восстановлении бетона конструкций гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2022. № 3. С. 39–45.

25. **Дринберг А.С.** Наконец-то универсальное покрытие // Специальная техника и оборудование. 2002. № 5. С. 19–20.
26. **Дринберг А.С.** Лакокрасочные покрытия с повышенной гидрофобностью для защиты от обледенения // Лакокрасочная промышленность. 2015. № 12. С. 30–36.

REFERENCES

1. Okhapkin G.V., Vasilevskaya L.S. Ensuring the safety and restoration of the volumetric structure of concrete, taking into account the optimization of operating costs during the life cycle of hydraulic structure. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo – Power Technology and Engineering*. 2022; 6: 34-39. (In Russ.).
2. Okhapkin G.V. Approaches to digital transformation of the choice of technical solutions for the restoration of the volumetric structure of concrete of hydraulic structure. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo – Power Technology and Engineering*. 2023; 4: 13-18. (In Russ.).
3. SP 41.13330.2012. Concrete and reinforced concrete hydraulic structures. Updated version of the SNiP 2.06.08-87 (with Change № 1). Moscow; 2012. (In Russ.).
4. SP 28.13330.2012. Protection against corrosion of construction. Updated version of the SNiP 2.03.11-85 (with Change № 1, 2). (In Russ.).
5. GOST 32016-2012. Materials and systems for protection and repair of concrete constructions. General requirements. Moscow: Standartinform; 2013. (In Russ.).
6. STB EN 1504-9-2019. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. Part 9. General principles for the use of products and systems. Minsk: Gosstandart; 2020. (In Russ.).
7. DIN EN 1504-9:2008. General principles for the use of products and systems. German version EN 1504–9:2008. 2008.
8. Girma S. A. Cracks in concrete and reinforced concrete structures. Technology of work on the elimination of cracks. *Naukovi zapiski*. 2010; 10(III):195-200. (In Russ.).
9. Moskvina V.M. Corrosion of concrete. Moscow: Gosstroizdat; 1952. 344 p. (In Russ.).
10. Stepanova V.F. Durability of concrete. Moscow, 2014. 126 p. (In Russ.).
11. Shilin A.A. Repair of reinforced concrete structures. Moscow: Gornaya kniga; 2010. 519 p. (In Russ.).
12. Okhapkin G.V. Substantiation of rational technical solutions for the repair of areal destruction of concrete hydraulic structures in the zone of variable level: dissertation abstract for the degree of Candidate of Technology. Saint Petersburg, 2019. 124 p. (In Russ.).
13. Gnyray A.I., Korobkov S.V. Technology of concrete works in winter conditions. Tomsk: TSUAB Publ. House, 2011.
14. Davidenko V.M., Okhapkin G.V., Bibina O.E. Contemporary methods for preparing the surfaces of hydraulic concrete structures for repair. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2018;289:52-58. (In Russ.).
15. Kozhukova M.I., Stokova V.V. Complex siloxane coating for superhydrophobization of concrete surfaces. *Stroitel'nye materialy*. 2014;3:26-30. (In Russ.).
16. Valenza J.J., Scherer G.W. Mechanisms of salt scaling. *Materials and Structures*. 2005; 38:479-488.
17. Valenza J.J., Scherer G.W. A review of salt scaling: I. Phenomenology. *Cement and Concrete Research*. 2007; 37:1007-1021.
18. GOST 32017-2012. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Requirements for systems for concrete protection in the course of repair works. Moscow: Standartinform; 2013. (In Russ.).

19. STB EN 1504-2-2009. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. Part 2. Surface protection systems for concrete. Minsk: Gosstandart; 2009. (In Russ.).

20. DIN EN 1504-2:2005. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Surface protection systems for concrete. German version EN 1504-2:2005. 2005.

21. GOST R 56378-2015. Materials and systems for the protection and repair of concrete structures. Requirements for products repair and bond connections for rehabilitation of structures. Moscow: Standartinform; 2015. (In Russ.).

22. STB EN-1504-3-2009. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. Part 3. Structural and non-structural repair. Minsk: Gosstandart; 2009. (In Russ.).

23. DIN EN 1504-3:2006. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Structural and non-structural repair. German version EN 1504-3:2006. 2006.

24. Okhapkin G.V., Vasilevskaya L.S. Analysis of approaches to the choice of methods for applying or laying repair materials for the concrete's restoration of hydro-technical facilities. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo – Power Technology and Engineering*. 2022;3:39-45. (In Russ.).

25. Drinberg A.S. Finally universal coverage. *Special'naya tehnika i oborudovaniye*. 2002;5:19-20. (In Russ.).

26. Drinberg A.S. Paint coating with increased hydrophobicity to protect against icing. *Lakokrasochnaya promyshlennost'*. 2015;12:30-36. (In Russ.).

Информация об авторах

Г.В. Охупкин – канд. техн. наук, старший научный сотрудник;

Н.С. Бакановичус – канд. техн. наук, зав. лабораторией;

А.А. Лялина – руководитель группы.

Information about the authors

G.V. Okhapkin – Cand. Sci. (Techn.), Senior Researcher;

N. S. Bakanovichus – Cand. Sci. (Techn.), Head of Laboratory;

A. A. Lyalina – Group Leader.

Статья поступила в редакцию 31.05.2023; одобрена после рецензирования 19.07.2023; принята к публикации 27.09.2023.

The article was submitted 31.05.2023; approved after reviewing 19.07.2023; accepted for publication 27.09.2023.

Научная статья
УДК 624.012.3/4:626/627

ОПЫТ КОМПЛЕКСНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГТС, НАХОДЯЩИХСЯ В ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Вячеслав Гедалиевич Штенгель

АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия, ShtengelVG@vniig.ru

Аннотация. Статья посвящена проблемам применения существующих методик технического обследования железобетонных элементов ГТС и повышению достоверности результатов. Предлагается разбивать сооружения по зонам обследования, в которых возможно применять и комбинировать различные методы и средства технического контроля. Особое внимание необходимо уделить безопасному доступу к поверхности бетона, учёту климатической и гидрологической обстановки в сроки проведения натурных работ, фактическому влажностному состоянию поверхности обследуемого бетона. Распространённые инструментальные методы и средства контроля дают определённую информацию о состоянии поверхностных слоёв бетона, которые могут не отражать фактического состояния внутренних зон.

Ключевые слова: конструкции, бетон, нормативная документация, обследование, методы неразрушающего контроля, прочность, дефектоскопия, доступ, условия контроля, требования, техническое задание, программа

Для цитирования: Штенгель В.Г. Опыт комплексного обследования железобетонных конструкций ГТС, находящихся в длительной эксплуатации // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 309. С. 79–101.

Original article

EXPERIENCE OF COMPLEX INSPECTION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF HYDRAULIC STRUCTURES IN LONG-TERM OPERATION

Vyacheslav G. Shtengel

JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia, ShtengelVG@vniig.ru

Abstract. The article is devoted to the problems of applying existing methods of technical inspection of reinforced concrete elements of hydraulic structures and improving the reliability of the results. It is proposed to divide the structures into survey zones in which it is possible to apply and combine various methods and means of technical control. Special attention should be paid to safe access to the concrete surface, taking into account the climatic and hydrological situation during the field observations, the actual humidity state of the surface of the concrete being examined. Common instrumental methods and controls provide certain information about the condition of the surface layers of concrete, which may not reflect the actual condition of the hearting zones.

Keywords: structures, concrete, regulatory documentation, inspection, non-destructive testing methods, strength, flaw detection, access, control conditions, requirements, terms of reference, program

For citation: Shtengel V.G. Experience of complex inspection of reinforced concrete structures of hydraulic structures in long-term operation. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;309:79-101. (In Russ.).

Введение

В ряду многих сооружений из бетона и железобетона особенно выделяются гидротехнические сооружения, которые должны удовлетворять определённым специфическим требованиям, связанным с их возведением и условиями эксплуатации. Кроме того, в сооружениях сочетаются бетоны различных сфер применения: как особые гидротехнические бетоны, так и материалы обычного промышленного назначения. К сожалению, нормативных документов, регламентирующих правила комплексного обследования ГТС с учётом особенностей их строительства и условий длительной эксплуатации практически нет. В частности, наиболее популярные в области обследований строительных конструкций ГОСТ 31937 [1] и СТО 14258110 (СП 13-102) [2], на которые часто ссылаются заказчики, прямо указывают, что их положения не распространяются на ГТС. В то же время некорректное применение методов и средств полевого инструментального контроля различных специфических железобетонных конструктивных элементов, входящих в состав сооружений: монолитных, сборных и сборно-монолитных (рис. 1), может привести к неверной оценке состояния объектов. Необходимо также отметить, что материалы, условия и технологии строительства и нормы проектирования должны соответствовать периоду возведения объектов, они часто не отвечают современным требованиям.

Согласно нормативам [3, 4], гидротехнический бетон подразделяют на несколько групп по степени погружения и воздействия водной среды:

- подводный (постоянно в воде или под землёй в зоне воздействия грунтовых вод);

- зоны переменного уровня воды и надводный (от 1 м над наивысшим уровнем воды);

 - надводный (выше зоны переменного уровня);

 - для водопропускных трактов (они подвержены вымыванию).

По объёму создаваемой конструкции материал делится:

- на массивный (сложные формы и большие размеры элемента, сопровождаемые при изготовлении неравномерным твердением с выделением тепла);

 - на немассивный (простые конструкции с небольшими габаритами).

По мере силового воздействия на затвердевшую конструкцию:

 - для напорных систем;

 - для безнапорных элементов.

По месту применения бетона:

- для внутренних конструкций за исключением водопроводящих тоннелей и водоводов (они менее подвержены вымыванию, напорам воды, но должны выдерживать статические воздействия);

- для внешних элементов и поверхностей (испытывают влияние активного движения воды и непостоянного внешнего воздействия).

Комплексное обследование бетона ГТС включает в себя два основных момента: выявление дефектов с оценкой их параметров и потенциала развития (визуально и инструментально) и оценку фактических физико-механических характеристик материалов (*в бездефектной зоне* конструкций) инструментальными методами неразрушающего контроля (НК) и с помощью лабораторных испытаний выбуренных кернов [5–14].

Спецификой состава гидротехнического бетона в массивных монолитных конструкциях является наличие в качестве крупного заполнителя гравийно-галечной смеси с фракцией до 100 мм (рис. 2), в отличие от промышленного бетона с крупным заполнителем до 25 мм. Данный фактор влияет и на характер трещинообразования, и на корректность инструментального контроля бетона (зависимость от количества, вида и локальной концентрации крупного заполнителя). При этом класс гидротехнического бетона по прочности на сжатие, в отличие от промышленного, определяется в возрасте 180, а не 28 суток. Это связано с тем, что процесс гидратации не прореагировавшего ранее цемента в присутствии воды может продолжаться десятилетиями. К сожалению, эта разница в определении характеристики различных по назначению бетонов часто не отражается в проектной документации. Кроме того, известно, что в процессе длительной эксплуатации бетон может набрать прочность в 1,5–3 раза выше проектной или исходной в зависимости от состава, локальных условий эксплуатации и внешних воздействий, что необходимо учитывать при поверочных расчётах. Соответственно, методика обследования различных конструктивных элементов в составе ГТС при определённых общих подходах должна иметь индивидуальную особенность.

Кроме того, особенностью ГТС является большая длительность строительства сооружений с перерывами монолитного бетонирования массивных конструкций, сменами технологий бетонирования и состава бетона, возможным наличием по проекту в сооружениях бетонов разных классов [14, 15]. Соответственно, изменяется конкретная градуировка приборов неразрушающего контроля бетона с часто неизвестными физико-механическими и структурными характеристиками материала конкретных конструкций или их контролируемых участков.



Рис. 1. Сборно-монолитная забральная балка (монолитная часть конструкции частично разрушена с обнажением сборной части)



Рис. 2. Обнажение бетонной кладки при разрушении поверхностного слоя. Вид крупного заполнителя – гальки размерами до 100 мм

Ещё одной специфической особенностью ГТС является наличие значительных зон мокрого, увлажнённого и влагонасыщенного бетона, что следует учитывать при выборе участков контроля, назначении сроков инструментального обследования, а также при обработке результатов ис-

питаний, так как условием получения достоверной информации является контроль *сухого* бетона. Учитывая, что методы НК, которые являются основой полевых инструментальных обследований, основаны на косвенных корреляционных зависимостях прочности бетона от его конкретных свойств, то изменение условий испытаний (особенно влажности бетона) может привести к изменению этих зависимостей. Достоверность и точность полученной информации при этом будет зависеть от возможностей надёжного безопасного доступа к контролируемым участкам конструкций, условной идентичности свойств бетона и локальных условий эксплуатации в пределах конкретного конструктивного элемента и сооружения, возможностей подготовки поверхности контролируемых участков, внешних условий проведения обследования и других косвенных факторов.

Обследование подводной части ГТС

Обследование, проводимое визуальным методом с использованием фото- и видеосъёмки [16], ограничено как по свойствам водной среды (мутность, скорость течения воды, заиливание дна), так и по состоянию поверхности конструкций (обрастание поверхности, иловые отложения). При этом реально выявление крупных дефектов и повреждений, крупных трещин-разломов (с раскрытием на поверхности более 0,5–1,0 мм) и их направленности, внешнего состояния швов, отклонения от проектных решений, участков эрозионного воздействия потоков воды и наносов, участков биологического разрушения поверхностного слоя бетона, обнажения и коррозии арматуры, просадки или выпора плит облицовки грунтовых сооружений. Геометрические параметры относительно мало раскрытых трещин даже после очистки поверхности достоверно определить в глубине водной среды практически невозможно (по нормативам предельное раскрытие трещин в бетоне допускается до 0,4 мм, а в морской среде – до 0,15 мм). Качество и достоверность получаемой информации зависит от освещённости контролируемого участка и от характеристик фото- и видеоаппаратуры. Приведённые на рис. 3 и 4 фотографии шва и трещины выполнены в прозрачной воде в солнечную погоду на уровне около 1,0 м от поверхности воды.



Рис. 3. Оценка ширины раскрытия межблочного шва под водой

Рис. 4. Раскрытие трещины до 5,0 мм под водой (съёмка на глубине до 1,0 м при солнечном освещении)

Обследование зоны переменного уровня воды

Обследование приборно-инструментальным методом даёт общий результат состояния материала конструкций, что также связано с состоянием поверхности бетона и условиями доступа к контрольным участкам. Неразрушающий контроль прочности бетона в условиях обводнения конструкции практически не эффективен и не даёт достоверных результатов.

Обследование этой зоны сооружений возможно при самом низком уровне воды (рис. 5).

С помощью визуального метода реально оценить степень и глубину разрушения поверхностных слоёв бетона и защитного слоя бетона, состояние швов, наличие и направленность раскрытых трещин (направленность, глубина и ширина раскрытия переменчивы по всей протяжённости трещины и не имеют чётко выраженных геометрических параметров в разных сечениях, рис. 6), уровень шероховатости поверхности, выявить обнажение и степень коррозии арматуры, участки отслоения защитного слоя бетона и арматурных стержней от коренного бетона.



Рис. 5. Разрушение бетона бычков в зоне переменного уровня



Рис. 6. Определение ширины раскрытия трещины, выходящей на поверхность конструкции, с помощью специального шаблона

Несмотря на обычно повышенную шероховатость поверхности бетона, в отдельных случаях появляется возможность применить инструментальные методы оценки прочности бетона: механический метод отрыва со скалыванием и ультразвуковой метод. В связи со значительной шероховатостью бетона и ограниченной возможностью сглаживания поверхности в необходимом по нормативам количестве контрольных участков, применение механического метода упругого отскока или ударно-импульсных приборов неэффективно и нецелесообразно. Ультразвуковые приборы должны иметь дисплей для контроля качества принятого сигнала, чтобы фиксировать без пропуска время прихода первого вступления продольной волны, и конические насадки на ультразвуковые преобразователи, что позволяет снизить требования к шероховатости поверхности. На осушенной ровной поверхности в отдельных случаях возможно также использование магнитных приборов и георадаров [10, 24] для определения фактического положения арматуры и оставшейся толщины защитного слоя бетона. Сложность и достоверность инструментальных обследований в значительной

степени определяется условиями обеспечения надёжного доступа к контрольным участкам конструкций.

Обследование железобетонных водопроводящих трактов и водопропускных сооружений

К конструкциям такой части ГТС можно отнести систему из приёмной камеры, водоводов, спиральной камеры, опорного конуса и отсасывающих труб. Сложность обследования системы заключается в сроках останова гидроагрегата и возможности полного осушения этой части сооружения. Слив или откачка воды во многих случаях (даже при надёжной герметизации затворов) не обеспечивает просушку стен, зоны донной части и сводов (рис. 7), так как возможно увлажнение конструкций конденсатом (согласно нормативным требованиям инструментальный контроль проводится на сухой поверхности бетона). Бетон блоков, формирующих водопроводящий тракт, может быть различным и по проектной прочности отличаться от бетона блоков, формирующих плотину [15]. Геометрические размеры в разных сечениях могут отличаться от проектных, например, при использовании непроектных покрытий выравнивающей штукатуркой или торкрет-бетоном, а также гидроизоляцией.



Рис. 7. Условия проведения обследований в отсасывающей трубе при дефектном уплотнении затвора

Обследование железобетонных облицовок туннелей, галерей, откосов грунтовых плотин и каналов

Обследование железобетонных облицовок конструктивных элементов ГТС имеет свои особенности: возможны участки отслоений облицовок от основания и наличие под облицовочных полостей, а также дополнительное (не всегда отражённое в проектной документации) покрытие поверхности облицовки слоем выравнивающей штукатурки (часто торкрет-бетоном), гидроизоляцией или применение несъёмной опалубки. Эти покрытия затрудняют доступ непосредственно к бетону для проведения ин-

струментального обследования, а также проведение обмерных работ для сравнения с проектными параметрами.

Визуальное обследование облицовок позволяет выявить; трещины с определением их параметров, выпоры отдельных секций, состояние швов и донной части, наиболее интенсивно подвергающейся воздействию водного потока, фильтрационные выходы через облицовку, обнажение и степень коррозии арматуры, шероховатость поверхности, участки отслоений и дефектов облицовок, а также выявить и оценить отклонения фактических форм и размеров конструкций от проекта. Существует возможность инструментального выявления зон отслоения облицовок от грунтового основания [23].

Инструментальная оценка фактических характеристик бетона возможна на локальных участках вскрытия защитного покрытия облицовки или при его отсутствии.

Обследование конструктивных элементов надводной части сооружений

Обследование таких конструкций наиболее осуществимо при максимальном использовании комплекса визуального (с фотофиксацией дефектов) и инструментальных методов и средств контроля бетона при обеспечении безопасного доступа к контролируемым участкам при возможности подготовки поверхности, а также на локальных участках вскрытия покрытия основного бетона. При этом допускается предположение, что все элементы в контролируемой зоне выполнены из бетона, идентичного по характеристикам, и эксплуатируются в одних и тех же условиях.

Визуально выявляются и фиксируются дефекты и повреждения конструкций, наличие трещин с определением их параметров (рис. 6), состояние швов, очаги фильтрации, расположение и размеры дефектов.

Инструментально методами НК оцениваются фактические характеристики бетона, фактическое расположение арматуры и толщина защитного слоя бетона. В ряде случаев выявляются скрытые дефекты (например, полости и отслоения плит железобетонного покрытия грунтовых откосов), глубина распространения трещин, расслоение материалов.

Обследование конструктивных элементов надземной части сооружений

Обследование надземных конструкций (зданий машинных залов, эстакад кранов для обслуживания затворов и др.) также следует включить в общий комплекс обследования сооружений ГТС, так как они обслуживают гидротехническое оборудование. Однако следует учесть, что такие сооружения часто выполняются из сборного или монолитного промышленного бетона. Соответственно, проектный класс бетона по прочности на сжатие таких конструкций определяется в возрасте 28 суток. Это характеризует иной интервал и степень финишного набора прочности. Требования к бетону (например, по морозостойкости) могут значительно отличаться от аналогичных требований к гидротехническому бетону. Составы тоже будут различаться. Соответственно, это потребует разработки новой корре-

ляционной зависимости «косвенный информационный параметр – прочность бетона на сжатие». Необходимо учесть, что многие конструктивные элементы могут быть покрыты выравнивающей или декоративной штукатуркой (снижается точность обмерных работ и доступ непосредственно к бетону) или краской, некоторые конструкции могут быть промаслены (рис. 8, 9).



Рис. 8. Цементно-песчаная штукатурка на монолитном бетоне



Рис. 9. Протечка масла из маслонапорной установки через перекрытие помещения закрытых распределительных устройств

Некоторые требования к составлению технического задания и программ обследования

Учитывая индивидуальные конструктивные и эксплуатационные особенности конкретных ГТС, для достоверной оценки фактического технического состояния железобетонных конструкций разработка технического задания и программ обследования должна проводиться совместно заказчиком и подрядчиком с согласованием всех рабочих моментов выполнения технического обследования. Эта работа в первую очередь ложится на заинтересованного заказчика. В этих документах, а также в составлении коммерческих предложений и смет должны быть учтены в полном объеме подготовительные мероприятия, а также возможные разработка и изготовление нестандартной оснастки. Необходимо предусмотреть согласование сроков и периода возможных этапов полевых исследований с учётом сезонности и региональных климатических особенностей, возможность остановок или маневрирования гидроагрегатов, надёжную работу затворов, возможность установки и эксплуатации спуско-подъёмных механизмов и оборудования (с согласованием таких работ со службами безопасности ГТС), обеспечение безопасного надёжного доступа к контролируемым конструктивным элементам и организацию субподрядных работ; возможность оперативного изменения сроков работ при внеплановых изменениях уровней воды (половодья или межени) или режимов эксплуатации оборудования.

Основные требования к использованию приборов НК бетона

В оперативном полевом инструментальном обследовании бетона ГТС чаще всего используются приборы для НК.

Основными общими требованиями, предъявляемыми к использованию НК, являются:

согласованный с заказчиком выбор зон контроля (для оценки физико-механических характеристик бетона сухих участков без видимых дефектов), которые выявляются на основании изучения технической информации и предварительного визуального обследования, в количестве, максимально приближенном к нормативным требованиям;

обеспечение надёжного безопасного доступа к контролируемым конструкциям с жесткой опорой для оператора-исследователя;

подготовка поверхности в области контроля (зачистка от наслоений, шероховатостей, облицовок, краски и др., максимально возможное выравнивание контролируемых участков бетона).

Соответственно, выбор методов и средств НК во многом определяется индивидуальными возможностями их использования на конкретных конструктивных элементах сооружений с учётом затрат времени на их проведение. Это часто требует специально разработанной и утверждённой программы использования методики, согласованной с заказчиком по условиям, уровню и достаточности обследований. При этом необходимо учесть некоторую условность полученных результатов и допущений однородности состава и свойств бетона в однотипных элементах, ярусах и захватках бетонирования, включая получение бетонной смеси часто с разных заводов и в разные периоды времени возведения ГТС даже в пределах одинаковых проектных требований.

Основные методы и средства полевого контроля бетона ГТС

Наиболее точную оценку прочности бетона и других его характеристик возможно получить при лабораторных испытаниях выбуренных кернов [7, 8]. Однако этот метод не оперативен, трудоёмок и требует значительных затрат на вспомогательные мероприятия по обеспечению надёжного доступа к контролируемым участкам сооружений для отбора кернов, связан с нарушением целостности конструкций, поэтому в данной статье вопросы выбуривания и испытания контрольных кернов не рассматриваются.

При полевых инструментальных исследованиях в основном используются комплексы методов и средств НК бетона. Кроме того, при необходимости, согласно п. 4.13 СТО 17230282.27.010.001-2007 [17], при предварительном определении категории опасности «А» (дефекты и повреждения основных несущих конструкций, представляющие непосредственную опасность их разрушения) проводятся поверочные расчёты.

Набор методов и средств НК бетона в эксплуатационных условиях в основном сформировался в середине XX века [9–11], а далее, естественно, при неизменных физических принципах контроля модернизировался. Определённые качественные скачки в разработках были выполнены при переходе от аналоговых приборов к цифровым, при совершенствовании электронной базы, при «уходе» от электропитания 220 В. Это значительно увеличило мобильность аппаратуры и расширило возможности применения её в сложных натуральных условиях. К сожалению, при совершенствовании аппаратуры НК ряд полезных приборных функций был убран, автома-

тизация регистрации и обработки полученной информации в ряде случаев снизила возможности её комплексного анализа. В угоду коммерческим интересам для массового применения комплекса НК в областях гражданского и промышленного строительства были значительно снижены требования к техническим характеристикам аппаратуры. Это, в свою очередь, уменьшило возможности дефектоскопии нестандартных крупногабаритных конструктивных элементов ГТС. Например, ультразвуковые приборы типа ДУК-20 и УКБ-1М позволяли прозвучивать при сквозном способе прозвучивания крупногабаритные конструкции толщиной до 3–6 м. Разрабатываемая серийная аппаратура, в первую очередь, предназначалась для массового использования на заводах железобетонных изделий (ЖБИ) и строительных площадках. Конструктивно и метрологически такие приборы не были адаптированы к полевым условиям обследования. В настоящее время в связи с большим количеством обследуемых объектов ГТС рационально вновь обратиться к разработке и использованию специальной аппаратуры на современной электронной базе с учётом специфики полевых условий применения приборов.

Существующая нормативная документация по обследованию в основном является продолжением документов, разработанных в период интенсивного строительства промышленных, энергетических и гидротехнических сооружений для контроля качества их возведения. Содержание этих документов не в полной мере учитывает специфику гидротехнического бетона действующих ГТС и условия, при которых приходится выполнять обследование сооружений через длительный срок их эксплуатации, в том числе условия доступа к конструкциям, что влечёт за собой изменение реальной возможности использования в полевых условиях измерительной аппаратуры и коррекцию методик инструментального обследования.

Нормативная база применения косвенных методов НК прочности бетона на сжатие также разработана в основном для использования, в первую очередь, на заводах ЖБИ и строительных площадках при наличии большого числа контрольных кубов или кернов для конкретного состава бетона. Это требование в полевых условиях контроля часто сложно или вообще невозможно выполнить в нормативном количестве контролируемых участков для формирования корреляционной зависимости косвенного информационного параметра НК от прочности бетона. Однако применение таких нормативов, максимально приближенных к реальной действительности, дисциплинирует исследователей и позволяет точнее определить корреляционную зависимость и, соответственно, повысить достоверность полученных результатов.

Например, наиболее часто для относительно простой оценки прочности бетона используются механические методы НК [10]. При этом метод отрыва со скалыванием (рис. 10) является нормативно допустимой заменой лабораторных испытаний выбуренных кернов. Однако для этого метода следует применять анкерные устройства, глубина заделки которых должна быть, с одной стороны, не менее максимального размера крупного заполнителя, с другой стороны, для стандартных устройств – не более 50 мм [10, 21]. Но в монолитных конструкциях ГТС часто размер крупного заполнителя превышает это допустимое для НК значение. При достаточном числе

контрольных испытаний полученные результаты в дальнейшем можно использовать для определения корреляционной связи информации от НК другими косвенными методами с фактической прочностью бетона. Например, при использовании независимого механического метода – метода упругого отскока с применением склерометра Шмидта (рис. 11). С помощью этого метода можно оценивать прочность поверхностного слоя бетона. Однако качество получаемой информации от этого метода очень зависит от степени шероховатости контролируемой поверхности и от влажности материала.



Рис. 10. Контроль прочности бетона методом отрыва со скалыванием



Рис. 11. Контроль прочности бетона механическим методом упругого отскока

Максимально достоверную информацию о прочности бетона можно получить при применении ультразвукового НК [11]. Причём в отличие от других методов НК такие испытания не требуют жесткой опоры для операторов и менее зависят от шероховатости поверхности бетона (рис. 12, 13). Наиболее точные результаты даёт применение способа сквозного прозвучивания, при котором трасса ультразвукового сигнала пересекает все слои бетона. Однако из-за специфики сооружений и обеспечения доступа к поверхности бетона на ГТС приоритетным является односторонний доступ к конструкциям. Это влечёт за собой максимальное использование способа поверхностного ультразвукового прозвучивания. Соответственно, при этом оценивается прочность поверхностного слоя бетона (при использовании стандартных преобразователей с частотой 60 кГц на базе прозвучивания 150 мм обеспечивается толщина информационного слоя бетона до 20 мм). Для перехода к оценке характера ультразвукового сигнала необходимо калибровать результаты с переходным поправочным коэффициентом, полученным при сквозном прозвучивании выступающих из профиля конструкций фрагментов.

При отсутствии такой возможности можно использовать вариант использования упрощённой схемы метода встречных годографов [22].

При использовании способа поверхностного прозвучивания бездефектного участка конструкции путём фиксации скоростей прохождения продольной и поверхностной волн возможно определение динамического и статического модулей упругости бетона.

Фирма «АКС» предлагает для дефектоскопии бетона при одностороннем доступе новый ультразвуковой томограф А1040 MIRA 3D, который позволяет контролировать толстостенные конструкции (до 3 м).

На достоверность полученного результата особое влияние оказывает квалификация оператора, поскольку ошибка в измерении скорости на 1 % приводит к ошибке в определении прочности бетона на 4–6 %. Недостаточная квалификация оператора, особенно в полевых условиях измерений, может исказить результаты контроля на 20–30 %.



Рис. 12. Контроль прочности бетона ультразвуковым методом



Рис. 13. Контроль прочности бетона ультразвуковым методом с использованием альпинистской оснастки

Исследования показали, что для корректной оценки прочности бетона конструкций оптимальным является *комбинирование* методов, дающих независимую информацию: чаще всего ультразвукового метода, метода упругого отскока и прямого механического метода отрыва со скалыванием [18].

В ряде случаев с помощью ультразвукового метода можно оценить локальную глубину распространения трещин, выходящих на поверхность конструкций (современными приборами до 25–30 см при условии, что зона трещины сухая, а сама трещина не засорена или закольматирована).

Последнее время в дефектоскопии бетона активно развивается метод георадиолокации [24]. Все задачи георадиолокации в этой области можно условно разделить на две группы. К первой относятся задачи обнаружения арматуры и поиск дефектов бетона (наличие трещин, локальных крупнопористых нарушений структуры бетона, полостей, стыков плит и блоков бетонирования). Ко второй группе относятся задачи изучения строения разрезов, расположенных ниже твёрдых покрытий. Развивается (на экспериментальном уровне) метод подводной георадиолокации [25].

Сочетание теплового и георадиолокационных методов при обследовании железобетонных плит крепления грунтовых откосов при соблюдении определённых климатических условий может помочь в выявлении скрытых подплитных полостей при толщине плит до 150 мм [23] (рис. 15, 16).

Для оптимального подбора и использования комплекса наиболее распространённых методов и средств НК для решения конкретных задач по обследованию конструкций ГТС можно воспользоваться информацией об их основных достоинствах и недостатках, сведённых в табл. 1. При этом необходимо отметить, что полученные результаты характеризуют свойства и состояние поверхностных слоёв бетона, которые не всегда распространяются на внутренние слои.



Рис. 14. Обрушение участка облицовки грунтового откоса канала над подплитной полостью

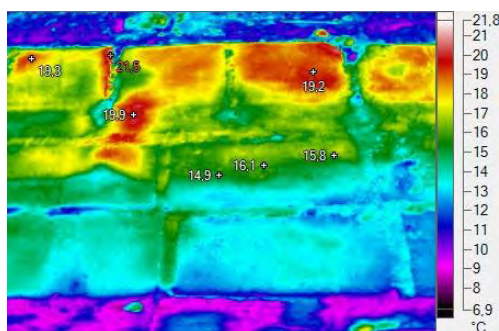


Рис. 15. Термограмма железобетонных плит крепления грунтового откоса канала. (Выделены аномальные области с потенциальным дефектом в виде подплитной полости, в последующем подтверждаемые георадиолокационным методом и контрольным бурением плит с визуализацией грунтового основания эндоскопом)



Рис. 16. Георадиолокационный поиск полостей под железобетонной облицовкой грунтового откоса

Некоторые особенности оценки фактического класса прочности бетона конструкций эксплуатируемых ГТС

Как было отмечено выше, в сооружениях встречаются бетоны различных модификаций: для непосредственно ГТС чаще монолитный бетон с нормативной проектной прочностью, оцениваемой на стадии строительства в возрасте 180 суток (R_{180}), и для надземных сооружений и сборных элементов ГТС, обеспечивающих проектную эксплуатацию оборудования, с прочностью бетона, предъявляемой в рамках требований к промышленному бетону и оцениваемой на стадии строительства в возрасте 28 суток (R_{28}). Согласно [14, п. 5.2], в зависимости от вида и условий работы в промышленном строительстве обычно применяются классы бетона по прочности на сжатие, которые отвечают значению гарантированной прочности бетона с обес-

печенностью $q = 0,95$ для R_{28} . В массивных монолитных ГТС чаще применяются бетоны со значениями гарантированной прочности с обеспеченностью $q = 0,90$ для R_{180} , а для внутренней зоны бетонных гравитационных плотин допускается применение монолитных бетонов со значениями гарантированной прочности с обеспеченностью $q = 0,85$.

Таблица 1

Основные достоинства и недостатки наиболее популярных полевых методов НК

Метод НК	Достоинства	Недостатки применяемого метода и средства НК
Визуальный контроль	Обзорный контроль позволяет установить пригодность объекта к контролю и необходимость детального контроля. Местный детальный контроль позволяет оперативно оценить параметры трещин и дефектов на поверхности конструкций, установить необходимость и состав мониторинга дефектов	Требования к условиям контроля (освещённость, удалённость, угол зрения, контрастность, общее состояние поверхности, влияние дополнительных покрытий контролируемого бетона, доступность проведения детального контроля, в том числе с применением вспомогательных измерительных свойств)
Механический метод отрыва со скалыванием	Определение прочности слоя бетона толщиной до 50 мм. Нормативная замена отбору кернов для разработки корреляционных зависимостей информации НК и прочности бетона	Локальное нарушение защитного слоя бетона. Требование предварительного поиска положения арматуры для минимизации её влияния на результат измерения. Влияние размеров крупного заполнителя (максимум до 50 мм). Ровность поверхности для надёжной установки прибора перпендикулярно поверхности. Относительная трудоёмкость. Повышенное требование к надёжности опоры для оператора НК. Физическая сложность контроля потолочных и сводчатых поверхностей
Механический метод скола ребра	Возможность определения прочности слоёв бетона до 70 мм на угловых частях конструкций, например, на порталах и входах галерей и порогах	Нарушение защитного слоя бетона. В контрольный участок попадают два поверхностных слоя бетона с потенциально отличающимися от ядра свойствами. Необходимость проверки отсутствия дополнительных слоёв выравнивающей штукатурки или гидроизоляционного покрытия. Возможное влияние на результат угловой силовой арматуры и хомутов. Требование предварительного поиска положения арматуры для минимизации её влияния на результат измерения

Метод НК	Достоинства	Недостатки применяемого метода и средства НК
Механический метод упругого отскока	Оперативная оценка прочности бетона защитного слоя. Выявление потенциальных участков нарушения свойств защитного слоя бетона	Фактическое определение твёрдости цементной матрицы поверхностного слоя бетона, состояния поверхностного слоя (шероховатость, выветривание, увлажнение, промасленность, наличие пленки цементного молока, состава, возможной карбонизации и т.д.). Сложность удаления поверхностного слоя в производственных условиях и, соответственно, ограничение числа контрольных участков. Необходимость постоянного контроля технического состояния приборов на металлической тест-наковальне. Требуется надёжная опора для оператора
Магнитный метод	Определение расположения и направленности арматурных стержней. При известном диаметре арматуры оценка толщины защитного слоя бетона. Выполнение разметки контрольного участка конструкции перед использованием НК прочности или при выбуривании кернов. Оценка взаимного расположения трещин и арматуры	Возможное влияние на настройку и использование аппаратуры в производственных стеснённых условиях концентраций металлоконструкций или электромагнитных полей. Ошибка в определении толщины защитного слоя бетона при армировании сварной сеткой. Возможность получения информации только о верхнем ряде стержневой арматуры и закладных. Погрешности результатов в густоармированных конструкциях
Ультразвуковой метод	Оценка прочности бетона на сжатие по корреляционным зависимостям. Оценка глубины трещин, расположенных вне зоны параллельных арматурных стержней, до 250 мм	Необходимость использования только приборов с визуализацией принимаемого сигнала, чтобы не пропустить приход продольной волны. Зависимость от технологических изменений состава бетонной смеси, нестабильности её уплотнения, изменений условий твердения, возраста, влажности бетона и др. Возможное наличие непроеKTного штукатурного покрытия. Расслоение и послойное изменение структуры и свойств бетона в сечении конструкций в процессе эксплуатации сооружения. Погрешность в определении базы измерения. Возможное влияние армирования и влажности бетона. Дискретность измерений. Коррекция результатов при поверхностном прозвучивании. Контроль в бездефектной зоне

Метод НК	Достоинства	Недостатки применяемого метода и средства НК
Ультразвуковая томография	Дефектоскопия и толщинометрия бетона при одностороннем доступе к конструкциям, визуализация внутренней структуры, контроль контакта слоёв, сухой акустический контакт с бетоном, шероховатость бетона до 10 мм	Использование поперечных ультразвуковых волн. Значительные габариты и вес антенны с системой преобразователей. Относительно ровная поверхность бетона по всей площади антенны. Надёжная неподвижная опора для оператора. Обеспечение стабильности прижима антенны в процессе контроля. Дискретность контроля. Физическая сложность контроля потолочных или сводчатых конструкций
Тепловой метод	Возможность по аномальным тепловым пятнам на термограммах выявить потенциальные дефекты облицовок грунтовых откосов или трассы скрытых фильтрационных проявлений	Зависимость от условий нагрева или остывания поверхности, состояния поверхности объекта, структурных и теплофизических характеристик бетона
Георадарный метод	Непрерывное сканирование по трассе перемещения антенны. Выявление неоднородностей и арматуры в бетоне, состояния и структуры основания под плитными конструкциями	Влияние электромагнитных полей, поиск арматуры на ровных, свободных поверхностях. Требование большой площади для локализации арматуры и невозможность обнаружения арматуры близко к краю конструкции. Шаг арматуры или размеры ячеек арматурной сетки. Интенсивность экранирующего эффекта, возрастающая с уменьшением шага армирования, увеличением сечения арматуры и уменьшением толщины слоя бетона над арматурной сеткой. Влияние влажности бетона и дополнительных защитных покрытий с отличающейся от основного бетона диэлектрической проницаемостью [24]
Колориметрический метод	Оперативная оценка глубины карбонизации	Размытость границы карбонизации, локальные условия влияния внешних факторов на контрольный участок

Определяемый класс бетона зависит от объема возможно получаемой информации, то есть от количества отобранных образцов из контролируемой зоны конструктивного элемента или от количества контрольных точек измерения при использовании методов НК и от однородности материала. ГОСТ 18105 [6] и ГОСТ 17624 [11] предлагают два варианта: с

определением характеристик однородности бетона по прочности для группы конструкций по схеме контроля «В» и без прямого определения характеристик однородности по схеме контроля «Г». При этом схема «Г» применяется при ограниченном количестве зон контроля с рекомендацией использовать приведённые, например, в ГОСТ 17624 универсальные линейные градуировочные зависимости, построенные по результатам испытаний конструкций в возрасте 20–30 суток (в технической литературе и в предыдущих вариантах нормативов предпочтение отдавалось степенной форме зависимостей), а фактический класс бетона принимают равным 80 % фактической средней прочности бетона:

$$B_{\phi} = 0,8R_{\phi}. \quad (1)$$

В общей технической литературе такое соотношение между классами классического (без специальных добавок) бетона по прочности на сжатие и марками приведено для средней прочности бетона R , рассчитанной при коэффициенте вариации равном 13,5 % и обеспеченности 95 % для всех видов бетонов и для числа замеров более 50, то есть при коэффициенте Стьюдента 1,64, что характерно для заводов ЖБИ и стройплощадок, где каждая градуировочная зависимость определяется для конкретного состава бетона. Однако для массивных монолитных гидротехнических конструкций это соотношение выглядит иначе, соответственно, при коэффициенте вариации равном 17 % и обеспеченности 90 % при коэффициенте Стьюдента 1,28.

Более логично и достоверно использовать схему контроля «В». В таком случае класс бетона должен определяться в соответствии с правилами статистики при допущении идентичности характеристик бетона в пределах единых проектных значений для исследуемых конструкций. Тогда определение условного класса бетона по сжатию «В_у» при выборочном обследовании сооружения и ограниченном количестве контрольных участков, определяемых возможностью и условиями доступа к конструкциям, проводится по общей формуле:

$$B = \bar{R}(1 - t_{\alpha} C_v), \quad (2)$$

где t_{α} – коэффициент Стьюдента для соответствующей обеспеченности, C_v – коэффициент вариации прочности, R – среднее значение прочности после установления параметров градуировочной зависимости между значениями информационных параметров применённого метода НК и прочностью бетона и после отбраковки аномальных результатов.

Необходимо особо отметить, что при инструментальной оценке прочности бетона информация снимается с поверхностного слоя бетона, который максимально подвержен длительному влиянию внешних эксплуатационных воздействий деструктивного характера.

Для корректной оценки состояния конструкций рекомендуется *комбинирование* методов, дающих независимую информацию, в частности:

для оценки прочности бетона – ультразвукового метода, метода упругого отскока, прямого механического метода отрыва со скалыванием, колорометрического метода;

для дефектоскопии бетона – георадарного, ультразвукового и ультразвуковой томографии;

для выявления полостей под плитами облицовок грунтовых откосов – теплового и георадарного (с проведением дальнейшего контрольного бурения плит и эндоскопии полости), ультразвуковой томографии;

для поиска арматуры и оценки защитного слоя бетона – магнитного и георадарного.

Таблица 2

Некоторые значения коэффициента Стьюдента t_a

Кол-во единичных значений прочности	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	30	∞
t_a для $q = 0,95$	6,31	2,92	2,35	2,13	2,01	1,94	1,89	1,86	1,83	1,80	1,76	1,71	1,64
t_a для $q = 0,90$	3,08	1,89	1,64	1,53	1,48	1,44	1,41	1,40	1,38	1,36	1,34	1,32	1,28
t_a для $q = 0,85$	1,96	1,39	1,25	1,19	1,16	1,13	1,12	1,11	1,10	1,09	1,08	1,06	1,04

Следует отметить, что в последнее время стали развиваться новые методики и средства контроля конструкций ГТС, позволяющие расширить объём и достоверность информации об их фактическом состоянии, например, акустическая томография и подводная георадиолокация [25], применение дронов для визуального и тепловизионного обследований. Однако все перспективные методы и средства НК должны рассматриваться исходя из возможности практического применения при обследовании конкретных конструкций ГТС с учётом эксплуатационных особенностей и условий доступа.

Разработка рабочей программы должна конкретизировать объект обследований, соответственно, речь может идти или об отдельных конструкциях, или о совокупности конструкций, возведённых и эксплуатирующихся в сходных технологических условиях. При этом с учётом возможностей доступа и подготовки поверхности определяются места испытаний и способы их выполнения. Следует отметить, что определение прочности бетона путём исследования отобранных кернов является наиболее достоверным, но и более дорогим методом. В то же время значительно более простые методы НК могут привести к существенным погрешностям. То есть возникает потребность оптимального решения противоречия между стоимостью работы и достоверностью полученного результата. При этом необходимо учесть, что косвенные методы НК бетона дают качественные или оценочные характеристики прочности и дефектов в основном поверхностных слоёв массивных монолитных конструкций ГТС. Относительно достоверные количественные данные можно получить только при большом количестве контрольных участков измерений при допустимости положения об идентичности проектных характеристик материала, что в условиях ограниченного доступа к конструкциям ГТС редко осуществимо. Соответственно, заказчик должен реально оценить достоверность и полноту получаемой информации.

Заключение

1. Для повышения достоверности результатов обследования ГТС предлагается разбивать сооружения по зонам обследования (подводная, переменного уровня, надводная, наружная, внутренняя), в которых возможно применять различные комбинации методов и средств технического контроля с конкретизацией требований к составу обследований и получению информации о состоянии конструктивных элементов ГТС.

2. Сочетание визуального и полевого инструментального методов позволит объективно оценить общее техническое состояние конструкций ГТС. Анализ полученной информации поможет оценить необходимость и состав дополнительных специализированных инструментальных обследований, лабораторных исследований и поверочных расчётов.

3. Комбинирование независимых методов контроля обладает синергетическим эффектом, повышающим достоверность итогового результата оценки технического состояния конструкций.

4. Распространённые инструментальные методы и средства контроля дают определённую информацию о состоянии поверхностных слоёв бетона, которые могут не отражать фактического состояния внутренних зон.

5. Для повышения достоверности получаемой информации заказчику необходимо предварительно обеспечить безопасный надёжный доступ к контролируемым конструктивным элементам ГТС с согласованиями со службами безопасности ГТС. Выполнение вспомогательных мероприятий по обеспечению такого доступа должно по срокам и дополнительному финансированию определяться совместно заказчиком и подрядчиком на стадии разработки технического задания и программы работ.

6. При заявке обследований заказчик в техническом задании должен учесть сезонные, гидрологические и климатические особенности района расположения ГТС, техническую возможность маневрирования гидроагрегатами и затворами, длительность и стоимость подготовительных мероприятий, включая при необходимости разработку и изготовление специальной оснастки, а также фактическое влажностное состояние поверхности обследуемого бетона с возможностью корректировки сроков выполнения полевых работ.

7. Необходимо разработать новые или скорректировать пункты имеющихся нормативных документов в разделах, относящихся к обследованию эксплуатируемых ГТС, с учётом зональности контролируемых конструкций. В отдельные разделы нормативных и методических документов рекомендуется выделить особенности применения методов и средств неразрушающего контроля с акцентом на ограничения их корректного использования в полевых условиях эксплуатации конструктивных элементов ГТС. Это крайне необходимо как подрядчикам, так и заказчикам работ для составления технических заданий и смет с учётом технических возможностей выполнения обследований.

8. Представленная статья носит во многом дискуссионный характер, материалы и выводы, возможно, носят субъективный характер. Автор предлагает широкое обсуждение поставленных проблем, что позволит в итоге выработать объективную структуру комплексных обследований железобетонных конструкций ГТС в полевых условиях эксплуатации и повысить достоверность полученных результатов и их анализа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **ГОСТ 31937-2011.** Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: Стандартинформ, 2014. 55 с.
2. **СТО 14258110-007-2015.** Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. М.: Перо, 2014. 62 с.
3. **ГОСТ 4795-53.** Бетон гидротехнический. Общие требования. М.: Стандартгиз, 1957. 6 с.
4. **ГОСТ 26633-2015.** Бетоны тяжёлые и мелкозернистые. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.
5. **ГОСТ Р ЕН 13018-2014.** Контроль визуальный. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2015. 4 с.
6. **ГОСТ 18105-2018.** Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.
7. **СО 34.21.343-2005.** Правила оценки физико-механических характеристик бетона эксплуатируемых гидротехнических сооружений. СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2006. 40 с.
8. **ГОСТ 28570-2019.** Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкции. М.: Стандартинформ, 2019. 13 с.
9. **ГОСТ 22690-2015.** Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2016. 23 с.
10. **ГОСТ 22904-93.** Конструкции железобетонные. Магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и расположения арматуры. М.: Стандартинформ, 2010. 11 с.
11. **ГОСТ 17624-2021.** Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200182175>.
12. **ГОСТ Р 57793-2017.** Гидравлические и гидроаккумулирующие электростанции. Гидротехнические сооружения. Мониторинг и оценка технического состояния в процессе эксплуатации. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2017. 38 с.
13. **ГОСТ Р 54523-2011.** Портовые гидротехнические сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: Стандартинформ, 2012. 107 с.
14. **СП 41.13330.2012.** Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87. М., 2012. 68 с.
15. **Телешев В.И., Ватин Н.И., Марчук А.Н., Чураков А.И.** Производство гидротехнических работ. Часть 1. Общие вопросы строительства. Земляные и бетонные работы. М.: АСВ, 2012. 488 с.
16. **СТО РусГидро 02.01.109-2013.** Подводно-техническое обследование состояния гидротехнических сооружений и примыкающих к ним участков неукрепленного русла. М., 2013. 46 с.
17. **СТО 17230282.27.010.001-2007.** Здания и сооружения объектов энергетики. Методы оценки технического состояния / ОАО РАО «ЕЭС России». 2007. 179 с.
18. **Джонс Р., Фэкзоару И.** Неразрушающие методы испытания бетонов. М.: Стройиздат, 1974. 296 с.
19. **Филонидов А.М., Третьяков А.К.** Контроль бетона ультразвуком в гидротехническом строительстве. М.: Энергия, 1969. 120 с.
20. **Почтовик Г.Я., Липник В.Г., Филонидов А.М.** Дефектоскопия бетона ультразвуком в энергетическом строительстве. М.: Энергия, 1977. 121 с.
21. **Улыбин А.В., Зубков С.В., Федотов С.Д.** Ошибки при определении прочности бетона методом отрыва со скалыванием // Науч. труды Общества железобетонщиков Сибири и Урала. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2016. Вып. 12. С. 14–19.

22. **Кудинов В.А., Штенгель В.Г.** Акустические испытания массивного бетона плотин при одностороннем доступе // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1990. Т. 221. С. 55–59.
23. **Глазунов В.В., Недялков В.С., Шадричев А.Е., Штенгель В.Г.** Методические особенности применения комплекса методов НК для выявления полостей под плитами крепления грунтовых откосов каналов // В мире неразрушающего контроля. 2015. № 2 (68). С. 16–21.
24. **Старовойтов А.В.** Интерпретация георадиолокационных данных. М.: Изд-во МГУ, 2008. 187 с.
25. **Широбоков М.П., Гусев О.С.** Развитие методов подводной георадиолокации при обследовании состояния гидротехнических сооружений // Гидротехника XXI век. 2022. № 3. С. 40–43.
26. **Штенгель В.Г.** О корректном применении НК в обследовании железобетонных конструкций длительно эксплуатирующихся сооружений // В мире неразрушающего контроля. 2009. № 3. С. 56–62.
27. **Исаков А.В., Штенгель В.Г.** Факторы, влияющие на достоверность результатов неразрушающего контроля бетона конструкций эксплуатируемых сооружений (из опыта обследований) // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2021. Т. 301. С. 85–108.
28. **Несветаев Г.В., Коллеганов А.В., Коллеганов Н.А.** Особенности неразрушающего контроля прочности бетона эксплуатируемых железобетонных конструкций // Науковедение. 2017. Т. 9. № 2.
29. **Несветаев Г.В.** Бетоны. Ростов-на-Дону: Феникс, 2011. 381 с.

REFERENCES

1. GOST 31937-2011. Buildings and constructions. Rules of inspection and monitoring of the technical condition. Moscow: Standartinform; 2014. 55 p. (In Russ.).
2. STO 14258110-007-2015. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. Moscow: Pero; 2014. 62 p. (In Russ.).
3. GOST 4795-53. Concrete for hydraulic engineering. General requirements Moscow: Standartgiz; 1957. 6 p. (In Russ.).
4. GOST 26633-2015. Heavy-weight and sand concretes. Specifications. Moscow: Standartinform; 2016. 12 p. (In Russ.).
5. GOST R EN 13018:2001 Non-destructive testing – Visual testing – General principles (IDT). Moscow: Standartinform; 2015. 4 p. (In Russ.).
6. GOST 18105-2018. Concretes. Rules for control and assessment of strength. Moscow: Standartinform; 2019. 16 p. (In Russ.).
7. SO 34.21.343-2005. Rules for assessing the physicommechanical characteristics of concrete in hydraulic structures in use. Saint Petersburg: Publishing house of JSC «Vedeneev VNIIG»; 2006. 40 p. (In Russ.).
8. GOST 28570-2019. Concretes. Methods of strength determination on cores selected from structures. Moscow: Standartinform; 2019. 13 p. (In Russ.).
9. GOST 22690-2015. Concretes. Determination of strength by mechanical methods of nondestructive testing. Moscow: Standartinform; 2016. 23 p. (In Russ.).
10. GOST 22904-93. Reinforced concrete structures. Magnetic method for the determination of the thickness of concrete protection layer and the location of the reinforcement. Moscow: Standartinform; 2010. 11 p. (In Russ.).
11. GOST 17624-2021. Concrete. Ultrasonic method of strength determination. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200182175>. (In Russ.).
12. GOST R 57793-2017. United power system and isolated power systems. Hydraulic and pumped storage power stations. Hydraulic engineering structures.

Monitoring and assessment of technical condition during operation. Main provisions. Moscow: Standartinform; 2017. 38 p. (In Russ.).

13. GOST R 54523-2011. Port hydraulic structures. Rules of inspection and monitoring of the technical condition. Moscow: Standartinform; 2012. 107 p. (In Russ.).

14. SP 41.13330.2012. Concrete and reinforced concrete hydraulic structures. Updated version of the SNiP 2.06.08-87. Moscow; 2012. 68 p. (In Russ.).

15. Teleshev V.I., Vatin N.I., Marchuk A.N., Churakov A.I. Production of hydraulic engineering works. Part 1. General construction issues. Excavation and concrete works. Moscow: ACB; 2012. 488 p. (In Russ.).

16. STO RusHydro 02.01.109-2013. Underwater-technical inspection of the condition of hydraulic engineering structures and sections of non-reinforced channel adjoining them. Moscow; 2013. 46 p. (In Russ.).

17. STO 17230282.27.010.001-2007. Power industry buildings and structures. Technical condition assessment methodics. 2007. 179 p. (In Russ.).

18. Jones R., Fekeoar I. Non-destructive testing methods of concrete. Moscow: Stroyizdat; 1974. 296 p. (In Russ.).

19. Filonidov A.M., Tretyakov A.K. Control of concrete by ultrasound in hydraulic engineering construction. Moscow: Energiya; 1969. 120 p. (In Russ.).

20. Pochtovik G.Ya., Lipnik V.G., Filonidov A.M. Concrete flaw detection by ultrasound in energy construction. Moscow: Energiya; 1977. 121 p. (In Russ.).

21. Ulybin A.V., Zubkov S.V., Fedotov S.D. Errors in determining the strength of concrete by the method of separation with chipping. *Nauchnye trudy Obshchestva zhelezobetonshchikov Sibiri i Urala – Scientific works of the Society of Reinforced concrete workers of Siberia and the Urals*. 2016;12:14-19. (In Russ.).

22. Kudinov V.A., Shtengel V.G. Acoustic tests of massive concrete dams with one-way access. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 1990; 221:55-59. (In Russ.).

23. Glazunov V.V., Nedyalkov V.C., Shadrichev A.E., Shtengel V.G. Complex of ndt methods for cavities detection under fastening plates of channels ground slopes. methodical features of application. *V mire nerazrushayushchego kontrolya – NDT World Review*. 2015;2(68):16-21. (In Russ.).

24. Starovoitov A.V. Interpretation of georadiolocation data. Moscow: MSU Publishing House; 2008. 187 p. (In Russ.).

25. Shirobokov M.P., Gusev O.S. Development of methods of underwater georadiolocation in the examination of the condition of hydraulic structures. *Gidrotekhnika XXI vek – Hydraulic engineering XXI century*. 2022; 3:40-43. (In Russ.).

26. Shtengel V.G. About correct application of reinforced concrete elements nondestructive inspection in constructions of long-term use. *V mire nerazrushayushchego kontrolya – NDT World Review*. 2009;3:56-62. (In Russ.).

27. Isakov A.V., Shtengel V.G. Factors that affect the results reliability of nondestructive testing of structural concrete in operated facilities (from inspection experience). *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2021;301:85-108. (In Russ.).

28. Nesvetaev G.V., Kolleganov A.V., Kolleganov N.A. Features nondestructive control concrete strength exploited concrete constructions. *Naukovedenie*. 2017; 9(2). (In Russ.).

29. Nesvetaev G.V. Concrete. Rostov-on-Don: Feniks, 2011. 381 p. (In Russ.).

Информация об авторе

В.Г. Штенгель – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник.

Information about the author

V.G. Shtengel – Cand. Sci. (Techn.), Lead Researcher.

Статья поступила в редакцию 19.06.2023; одобрена после рецензирования 19.07.2023; принята к публикации 27.09.2023.

The article was submitted 19.06.2023; approved after reviewing 19.07.2023; accepted for publication 27.09.2023.

Научная статья
УДК 551.311.22

ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ СКАЛЬНЫХ И КРУПНООБЛОМОЧНЫХ ГРУНТОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ФИЗИЧЕСКОМ ВЫВЕТРИВАНИИ

Олег Константинович Воронков¹, Лариса Федоровна Ушакова²

^{1,2}АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия, UshakovaLF@vniig.ru

Аннотация. С целью оценки влияния физического выветривания на состояние скальных, полускальных и крупнообломочных грунтов выполнены длительные циклические эксперименты (до 6757 циклов). Оценена потеря массы и изменение гранулометрического состава грунтов. Показана пригодность горной массы изверженных и метаморфических пород во внешних и внутренних зонах каменно-земляных и каменно-набросных плотин и необходимость экспериментального обоснования использования горной массы осадочных скальных пород.

Ключевые слова: скальные, полускальные и крупнообломочные грунты, морозное и температурное выветривание, увлажнение-высыхание, тысячи циклов, состояние грунтов, горная масса каменно-набросных плотин

Для цитирования: Воронков О.К., Ушакова Л.Ф. Изменение состояния скальных и крупнообломочных грунтов при длительном физическом выветривании // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 309. С. 102–118.

Original article

CHANGES IN THE STATE OF THE ROCKY AND VERY COARSE SOILS WITH PROLONGED PHYSICAL WEATHERING

Oleg K. Voronkov¹, Larisa F. Ushakova²

^{1,2}JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia, UshakovaLF@vniig.ru

Abstract. In order to assess the effect of physical weathering on the condition of rocky, semi-rocky and very coarse soils, long-term cyclic experiments (up to 6757 cycles) were performed. The loss of mass and the change in the granulometric composition of soils were estimated. The suitability of the rock mass of igneous and metamorphic rocks in the outer and inner zones earth and rock-fill dams and rock-fill dams and the need for experimental justification of the use of the mass of sedimentary massive rock were shown.

Keywords: rocky, semi-rocky, very coarse soils, frost and temperature weathering, moisture-drying, thousands of cycles, soil condition, rock mass of rock-fill dams

For citation: Voronkov O.K., Ushakova L.F. Changes in the state of the rocky and very coarse soils with prolonged physical weathering. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;309:102-118. (In Russ.).

Введение

Выветривание – процесс изменения и дезинтеграции горных пород под влиянием физических, химических и биологических факторов. Если в тропической и субтропической климатических зонах основную роль играет гидрохимическое выветривание, то в зонах умеренного, холодного и полярного климата, характерных для большинства регионов России, преобладает физическое выветривание (ФВ) с его компонентами: морозным, увлажнения-высыхания и температурным [1–6].

Морозное (криогенное) выветривание (МРВ) предполагает периодическое замораживание-оттаивание трещинной и поровой воды в породе и обусловлено напряжением кристаллизации льда $\sigma_{\text{л}}$. Для природных условий криолитозоны значение $\sigma_{\text{л}}$ при замерзании водонасыщенных грунтов приближенно оценивается по формуле Б. Халлета [6]:

$$\sigma_{\text{л}} \approx 1,14 \cdot |t|, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где $|t|$ – температура мерзлой породы ($^{\circ}\text{C}$), абсолютное значение.

Выветривание увлажнения-высыхания (ВУВ) связано с расклинивающими напряжениями $\sigma_{\text{в}}$ водных пленок. Наиболее вероятные максимальные значения $\sigma_{\text{в}}$ – первые единицы МПа, причем в ультрамикротрещинах возможно $\sigma_{\text{в}} \leq 10$ МПа [7, с. 26].

Температурное (термическое) выветривание (ТВ) обусловлено температурными объемно-градиентными напряжениями $\sigma_{\text{т}}$, величина которых прямо пропорциональна градиенту температуры ∇t и максимальной разнице коэффициентов температурной деформации ($\Delta\alpha = \alpha_{\text{макс}} - \alpha_{\text{мин}}$) минералов, слагающих породу:

$$\sigma_{\text{т}} = A \cdot \Delta\alpha \cdot \nabla t. \quad (2)$$

В природных условиях величина $\sigma_{\text{т}}$ в большинстве случаев составляет доли МПа.

В зависимости от природно-климатических и инженерно-геологических условий главной причиной дезинтеграции пород при ФВ могут выступать $\sigma_{\text{л}}$ либо $\sigma_{\text{в}}$, редко $\sigma_{\text{т}}$. Так, в условиях знакопеременной температуры и наличия в порах воды главная причина дезинтеграции – $\sigma_{\text{л}}$; в условиях положительной температуры и переменной влажности – $\sigma_{\text{в}}$; в условиях полярного сухого климата – $\sigma_{\text{т}}$, с чем связано, например, образование приповерхностного слоя реголита Луны и пыли кварцевых диоритов в Антарктиде.

В связи с использованием в гидротехническом, дорожном и гражданском строительстве в качестве оснований и строительного материала скальных и крупнообломочных пород, в частности горной массы, актуальна оценка их «старения», в том числе изменения состава, состояния и свойств в процессе строительства и эксплуатации, когда грунт длительное время подвергается воздействию факторов физического выветривания.

В 1975–2023 гг. авторами выполнялись эксперименты по оценке влияния процессов физического выветривания на состояние и свойства различных скальных и полускальных горных пород (граниты, гнейсы, гранодиориты, метаморфические сланцы и песчаники, известняки, алевроли-

ты, мергели и др.): более 120 образцов в виде кубиков (5×5×5 см), прямоугольных параллелепипедов (5×5×10 см) и более 600 образцов горной массы. Испытаниям на циклическое замораживание-оттаивание (ЦЗО) и увлажнение-высыхание (ЦУВ) подвергались образцы горных пород оснований ГЭС. Опыты проводились отдельно для групп водонасыщенных и воздушно-сухих пород и выполнялись в режиме 10–16 часов замораживания в морозильной камере при минимальной температуре минус 15–20 °С и 8–14 часов оттаивания при температуре воздуха около плюс 20 °С, что близко к «сибирскому» типу выветривания. Образцы гранитоидов (граниты, гнейсы, гранодиориты, гранито-гнейсы) подвергались испытаниям в течение 6757 циклов МРВ и ТВ, метаморфизованных глинистых сланцев и песчаников – 5027 циклов ТВ и ВУВ; доломитизированных известняков – 4725 циклов МРВ, ТВ и ВУВ; мраморизованных известняков и кварцевых песчаников – 2000 циклов МРВ и ТВ. Такое число циклических испытаний грунтов было выполнено впервые. Ранее известное из литературы число циклов в аналогичных опытах на МРВ было 500 [8], число циклов ТВ – 2000 [9], а число циклов ВУВ – 396 [10].

В процессе испытания пород на циклическое воздействие факторов МРВ, ТВ, ВУВ авторами осуществлялся периодический контроль следующих характеристик:

массы образцов, высушенных перед очередным взвешиванием до абсолютно сухого состояния с оценкой значения потери массы,

$$\Delta M/M_0 = [(M_0 - M_i) / M_0] 100 \%, \quad (3)$$

где M_0 – масса сухого образца перед началом испытаний; i – число циклов; M_i – масса сухого образца после i циклов;

гранулометрического состава (при дезинтеграции пород);

скорости распространения продольной упругой волны V_p в образцах (кубиках и параллелепипедах) при ультразвуковом просвечивании с целью оценки значений физико-механических характеристик по известным корреляционным связям [1].

Оценка влияния компонентов физического выветривания (МРВ, ТВ, ВУВ) на дезинтеграцию скальных и полускальных пород

Устойчивость скальных и полускальных пород (как материала в гидротехническом и дорожном строительстве) к основным факторам физического выветривания можно оценить по величине потери массы $\Delta M/M_0$ образцов при циклическом замораживании-оттаивании (рис. 1) и увлажнении-высыхании (рис. 2). Показанной на рис. 1 зоне с индексом I отвечают магматические и метаморфические группы пород: диабазы, диориты, габбро, базальты, кварциты, граниты, гнейсы, кристаллические сланцы и др. В качестве горной массы они могут использоваться в любых зонах плотин из местных материалов.

Выполненные авторами длительные эксперименты свидетельствуют о следующем:

1. Даже среди высокопрочных в исходном состоянии скальных пород (прочность $R_c > 110$ МПа) ряд образцов в процессе МРВ начал разру-

шаться, начиная с 1000 ЦЗО (рис. 3). Причем кубики (5×5×5 см) гранитов и мраморизованных известняков разрушались на крупные обломки и щебень. А кварцевые песчаники на ребрах образцов дезинтегрировали до состояния песка.

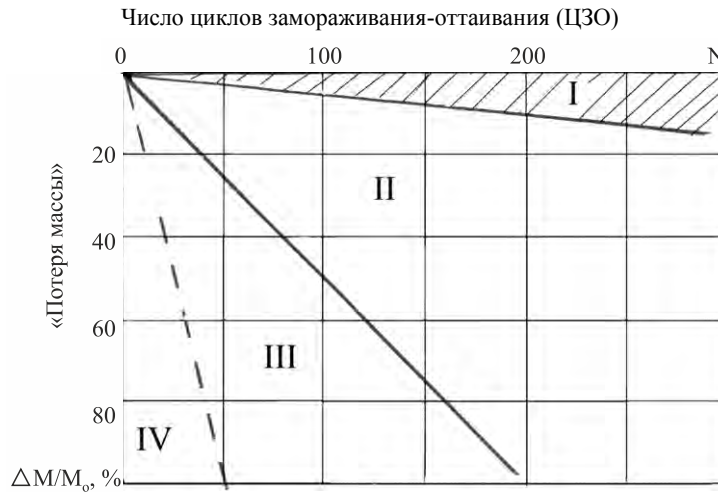


Рис. 1. Оценка морозостойкости горной массы как материала грунтовых плотин: зависимость потери массы $\Delta M/M_0$ водонасыщенных образцов пород от числа циклов замораживания-оттаивания N ;

I – морозостойкая, безусловно пригодная как морозостойкий материал, в том числе в наиболее напряженные внешние и внутренние зоны плотины; II – пригодна в аэрированных частях внутренних зон низовой призмы плотин, необходимо обоснование; III – использование возможно во внутренних (аэрированных) зонах низовых упорных призм, необходимо обоснование; IV – использование в составе каменной наброски не рекомендуется

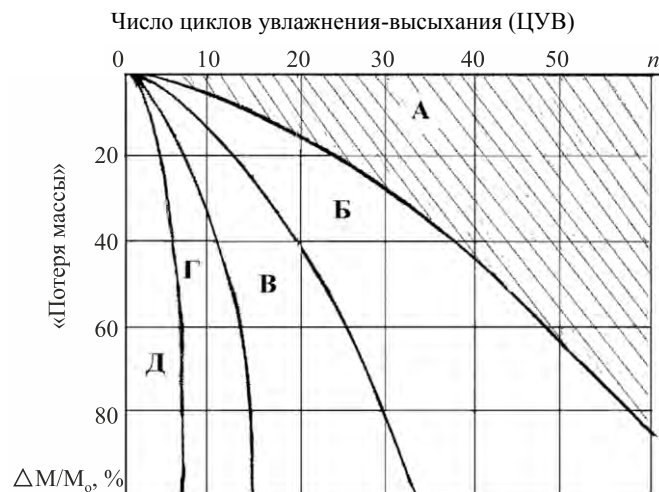


Рис. 2. Оценка устойчивости к выветриванию полускальных горных пород, используемых в дорожном строительстве (по [11]):

A – грунты устойчивые, с максимальной скоростью выветривания $C_{\max} = 0,015$ м/год;
 Б – грунты среднеустойчивые, $C_{\max} = 0,057$ м/год;
 В – грунты слабоустойчивые, $C_{\max} = 0,275$ м/год;
 Г – грунты неустойчивые, $C_{\max} = 1,405$ м/год;
 Д – грунты весьма неустойчивые, $C_{\max} > 1,500$ м/год

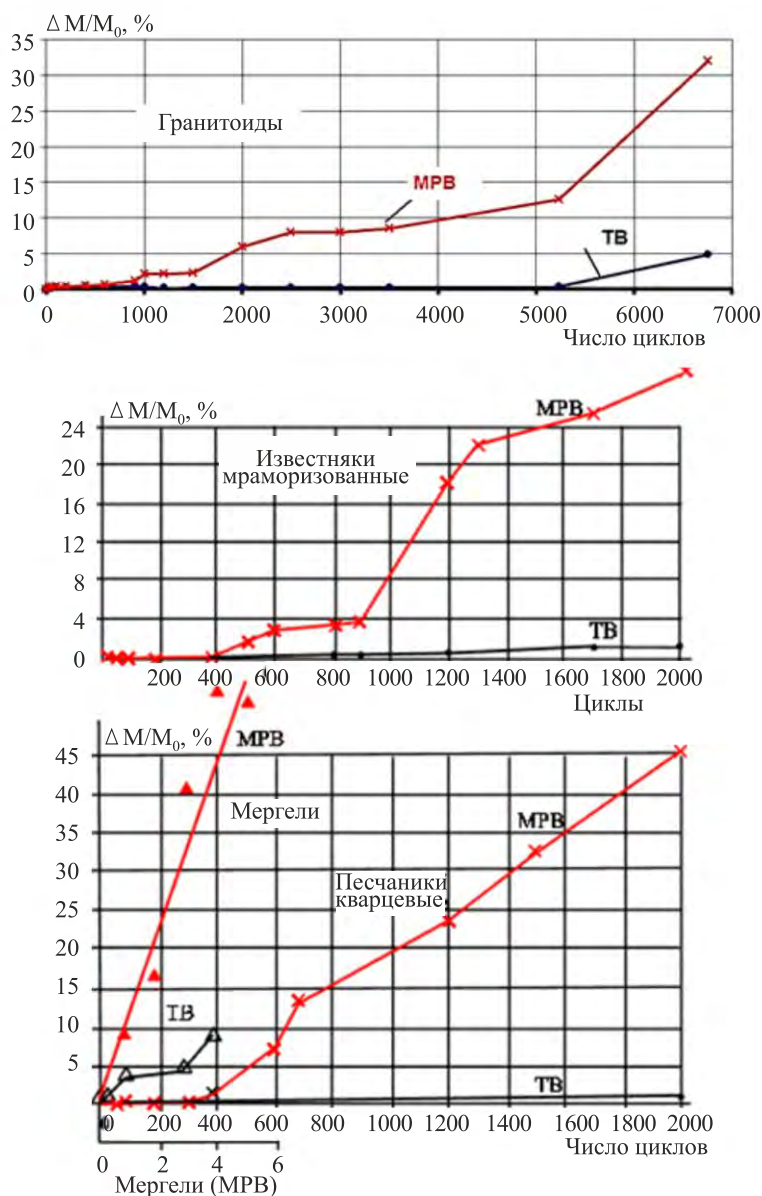


Рис. 3. Влияние температурного (ТВ) и морозного (МРВ) выветривания на относительное изменение массы ($\Delta M/M_0$) горных пород

2. Образцы-близнецы тех же пород после испытания на температурное выветривание (6757 циклов ТВ) по визуальной оценке практически не изменились (отмечена лишь выщербленность на ребрах кубиков).

3. В прочных малопористых скальных породах при непродолжительном процессе выветривания (до 400–600 ЦЗО) начальные графики потери массы при МРВ и ТВ близки, и их существенное расхождение происходит при 400 ЦЗО и более (рис. 3). Отсюда следует, что микротрещинообразование в таких грунтах происходит под влиянием ТВ, которое выполняет роль «забойщика» и создает необходимые предпосылки для развития процесса МРВ.

4. При длительном процессе МРВ и ТВ (более 5000 циклов) даже в высокопрочных образцах скальных пород (гранитоиды и др.) образуется обширная система микротрещин, которые препятствуют ультразвуковому просвечиванию образцов после их высушивания до абсолютно сухого состояния. Непрохождение ультразвуковых волн установлено приблизительно для 20 % образцов после 5000 ЦЗО (прибор УКС-МГ4С фиксировал отсутствие сигнала).

5. Дезинтеграция и полное разрушение при МРВ полускальных пород (мергели, аргиллиты, алевролиты с размокающим цементом) происходит уже при 5–10 ЦЗО (рис. 3).

6. В прочных скальных породах роль МРВ в процессе дезинтеграции в 5–10 раз существеннее, чем роль ВУВ. Однако в полускальных размокающих породах (аргиллиты, мергели и др.) графики потери массы при МРВ и ВУВ в зависимости от числа циклов практически совпадают (рис. 4). Это говорит о том, что полускальный размокающий грунт дезинтегрирует при циклах ВУВ (вне криолитозоны) точно так же, как и тот же грунт в условиях морозного выветривания (МРВ).

7. Роль ВУВ в дезинтеграции прочных скальных пород хотя и уступает роли МРВ (рис. 4, а), но на порядок и более превосходит роль ТВ (рис. 5).

8. При совместном воздействии всех трех компонентов ФВ вклад каждого из них в общую дезинтеграцию скальных пород в большинстве случаев следующий: МРВ – до 60–80 %, ВУВ – до 25–40 %, ТВ – до 2–7 %.

9. Графики зависимости потери массы $\Delta M/M_0$ от числа циклов МРВ, ТВ, ВУВ в общем случае носят кусочно-линейный характер при линейном тренде (рост $\Delta M/M_0$ с увеличением числа циклов – рис. 3, 5). Поэтому линию тренда допустимо аппроксимировать прямой, исходящей из начала координат.

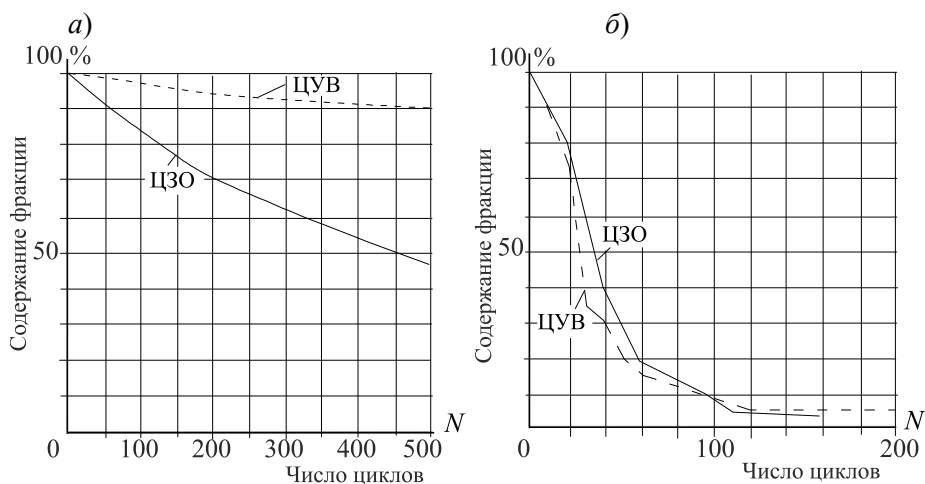


Рис. 4. Дезинтеграция крупных фракций слабо-размокающих скальных (а) и размокающих полускальных грунтов (б) при циклическом замораживании-оттаивании (ЦЗО) и циклическом увлажнении-высыхании (ЦУВ):

а – породы песчанико-сланцевого комплекса бассейна р. Колымы (основание Усть-Среднеканской ГЭС), фракции размером 40–80 мм (данные авторов);
 б – аргиллиты (Большой Кавказ и Предкавказье), фракции размером более 10 мм (данные по [12])

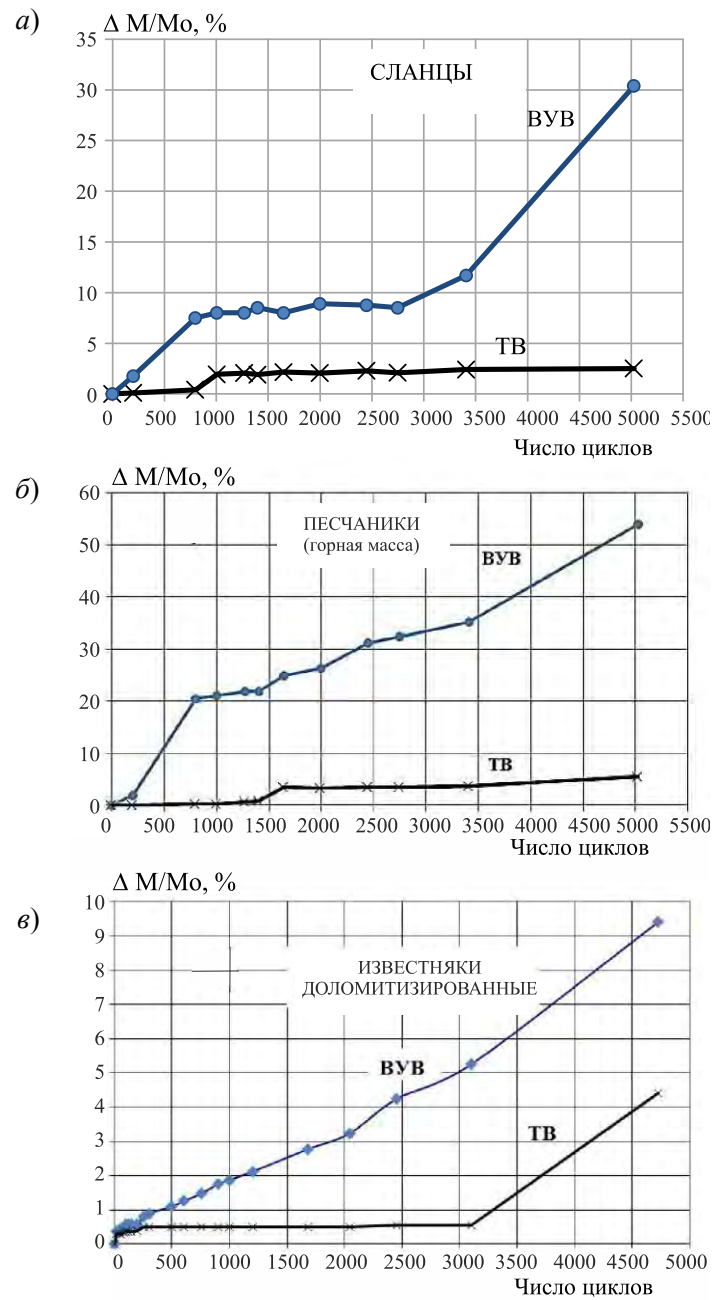


Рис. 5. Влияние выветривания увлажнения-высыхания (ВУВ) и температурного выветривания (ТВ) на относительные изменения массы $\Delta M/M_0$ горных пород:
а, б – метаморфизованные глинистые сланцы и песчаники (Усть-Среднеканская ГЭС);
в – доломитизированные известняки (Ленинградская область)

10. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о пригодности магматических и метаморфических пород во всех зонах каменнонабранных плотин и необходимости экспериментального обоснования возможности использования в составе наброски скальных пород осадочного происхождения. Размокающие грунты (мергели, аргиллиты, мелы, гип-

сы, слабые алевролиты и сланцы) в большинстве случаев малопригодны даже для внутренних зон каменно-набросных плотин.

11. При оценке дезинтеграции пород в теле реальных плотин необходимо учитывать, что число ЦЗО экспоненциально уменьшается с удалением от дневной поверхности. Поэтому, например, для гидроузлов в бассейне р. Колымы на глубине 20 см число ЦЗО будет примерно в 3 раза меньше, чем на дневной поверхности [1].

Примеры дезинтеграции скальных пород после 5235 циклов МРВ и ТВ показаны на рис. 6, 7.

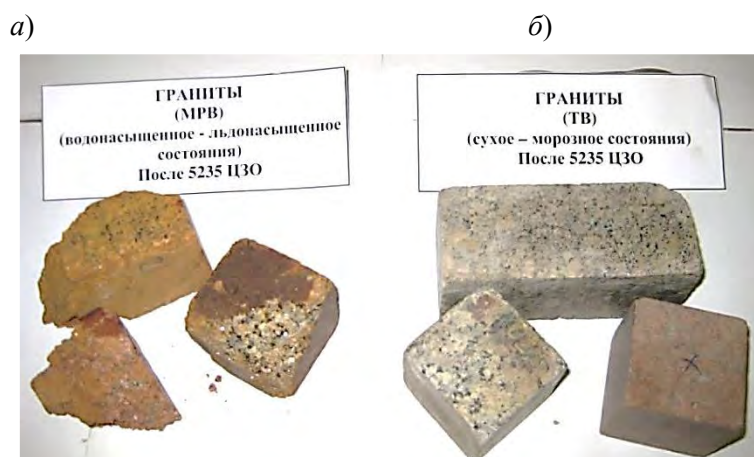


Рис. 6. Состояние гранита кварц-плагиоклазового (створ р. Буюнды) после 5235 ЦЗО: а – водонасыщенное состояние (МРВ); б – воздушно-сухое состояние (ТВ)



Рис. 7. Дезинтеграция известняка мраморизованного (Красноярская ГЭС) после 5235 ЦЗО; водонасыщенное и льдонасыщенное состояния (МРВ)

Изменения гранулометрического состава крупнообломочных грунтов (горной массы) при длительном физическом выветривании

Температурно-влажностные воздействия (ТВВ) на крупнообломочные грунты (в том числе – горную массу) неизбежно приводят к их дезинтеграции: уменьшению процентного содержания крупных фракций («генератора») и росту содержания мелких фракций (дочерних). Это обуславливает изменение физико-механических и фильтрационных характеристик грунтов [1].

Авторами выявлены и экспериментально подтверждены следующие закономерности изменения грансостава с ростом числа ЦЗО [1, 3–5]:

1. По мере уменьшения процентного содержания фракций «генератора», когда их сумма снижается до величины $(20 \pm 5) \%$ в состав «генератора» включается наиболее крупная дочерняя фракция (смежная с «генератором»), процентное содержание которой начинает нелинейно уменьшаться по мере роста числа циклов ТВВ.

2. После того как в обновленном «генераторе» вновь останется $(20 \pm 5) \%$ грунта, к «генератору» присоединится следующая, наиболее крупная из дочерних фракций и т. д., т. е. процесс дезинтеграции приобретает закономерный циклический характер (рис. 8).

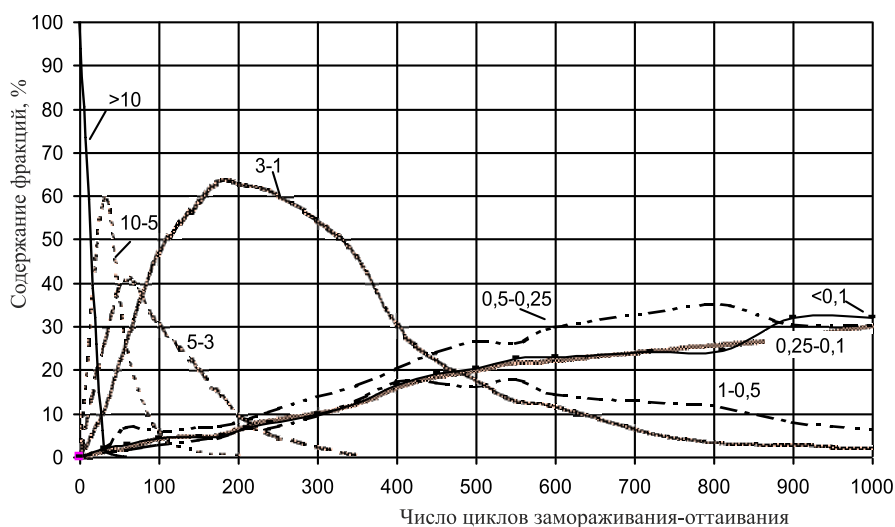


Рис. 8. Характер дезинтеграции крупной фракции породы, представленной водонасыщенным алевролитом (основание Зирани ГЭС), в зависимости от числа ЦЗО; цифры – диаметры частиц, мм; экспериментальные данные авторов

Выполненные авторами экспериментальные определения гранулометрического состава крупнообломочных грунтов при большом числе циклов ТВВ не имеют опубликованных аналогов, поэтому практический интерес представляют результаты, полученные при изучении таких грунтов, крупная фракция которых представлена как скальными, так и полускальными породами.

Поскольку горная масса изверженных и метаморфических пород, как правило, устойчива к факторам ФВ, то ее использование во всех зонах грунтовых плотин не вызывает сомнения. Поэтому внимание изыскателей и исследователей должно быть направлено на среднеустойчивые и неустойчивые скальные и полускальные породы.

В связи с этим ниже приведены результаты исследований влияния ФВ на фракционный состав элементов горной массы, представленной:

а) скальными отдельностями – слабометаморфизованными породами сланцево-песчаникового комплекса (бассейн р. Колымы), доломитами (Саратовская область) и доломитизированными известняками (Ленинградская область);

б) полускальными отдельностями – мергели (Светлинская ГЭС), алевролитами алевроитовыми (Зирани ГЭС).

Горная масса скальных пород

1. Горная масса участка Усть-Среднеканской ГЭС на р. Колыме представлена слабометаморфизованными глинистыми сланцами и песчаниками флишоидной толщи верхоянского комплекса нижней юры (J_1^2). Эти породы широко распространены в Магаданской области, Якутии, на Чукотке.

Влияние факторов МРВ, ВУВ и ТВ на гранулометрический состав изучалось на примере дезинтеграции горной массы, представленной фракциями 40–80 мм (90 %) и 20–40 мм (10 %). Каждая из трех групп образцов-обломков остроугольной формы проходила циклы МРВ (замораживание-оттаивание водонасыщенных пород), ВУВ (водонасыщение-высушивание пород), ТВ (замораживание-оттаивание сухих пород). Всего выполнено 5027 циклов. Основные данные экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние морозного выветривания, выветривания увлажнения-высыхания и температурного выветривания на гранулометрический состав (%) горной массы флишоидной толщи (метаморфизованного глинистого сланца и песчаника) участка Усть-Среднеканской ГЭС на р. Колыме

Число циклов	МРВ ВУВ ТВ	Содержание фракций, %				
		40–80 мм	20–40 мм	10–20 мм	1–10 мм	< 1 мм
0		90	10	0	0	0
100	ТВ	82	18	0	0	0
200	МРВ	14	12	19	35	20
	ВУВ	77	17	2,3	1,6	2,1
500	МРВ	12	8	8	46	26
	ВУВ	70	15	2	3	10
1000	МРВ	9	5	5	51	30
	ВУВ	65	17,5	4	6	7,5
	ТВ	80,4	17,8	1	0,3	0,5
1500	МРВ	5	3	2	50	40
	ВУВ	58	23	3	8	8
1820	ТВ	80,2	17,8	0,04	0,06	1,9
2000	МРВ	6	3	2	46	43
	ВУВ	57	21	3,0	10	9
	ТВ	80,2	17,7	1,1	0,4	0,6
3000	МРВ	6	3	2	39	50
	ВУВ	51	21	4	12	12
3410	ТВ	80	17,6	1,4	0,4	0,6
5027	МРВ	3	2	2	20	73
	ВУВ	34	30,5	4,5	0,5	30,5
	ТВ	80	17,4	1,6	0,4	0,6

Под воздействием наиболее сильного фактора дезинтеграции – МРВ после 500–1000 ЦЗО (что примерно соответствует временному отрезку равному 10–20 годам в приповерхностной зоне) горная масса сланцево-песчаникового комплекса перестала быть крупнообломочным материалом на 26–38 %, а после 3000 ЦЗО – на 50 % и перешла в категорию песка и глины. Отметим, что речь идет о приповерхностной зоне мощностью 5–10 см, так как уже на глубине 20 см число ЦЗО уменьшается примерно в 3 раза. Влияние факторов ВУВ и ТВ значительно меньше (табл. 1).

Таким образом, эксперименты свидетельствуют о пригодности использования горной массы сланцево-песчаникового комплекса во внутренних зонах каменно-набросной плотины. В приповерхностной зоне плотины, где при циклическом замораживании-оттаивании водосодержащих пород после 10–20 лет эксплуатации возможен частичный переход крупнообломочного материала в песок и глину, желательна внешняя зона наброски выполнять более морозостойким материалом (гранитом и др.).

2. *Щебенистая подушка оснований сооружений Балаковской АЭС* представлена горной массой доломита среднего карбона (С₂) Березовского карьера Саратовской области. Отдельности доломитов имели плотность $\rho_d = 2,35–2,39$ г/см³ (средняя 2,38 г/см³), плотность минеральных частиц $\rho_s = 2,77$ г/см³, пористость $n = 14$ %. Модуль деформации щебенистой подушки характеризовался высокими значениями: $E_{деф} = 64–334$ МПа. Исходное содержание фракций составляло: 40–80 мм (7,9 %), 20–40 мм (92,1 %). В химическом составе преобладали окислы кальция и магния.

При циклическом замачивании и высушивании образцов оказалось, что после 250 циклов ВУВ масса пробы уменьшилась на 1,55 %, что свидетельствует о слабой размягчаемости доломитов основания сооружений Балаковской АЭС.

Грунт оказался достаточно морозостойким (табл. 2) – после 1480 ЦЗО крупнообломочная фракция осталась высокой (89 %). Внешний вид обломочного материала, первоначально с острыми углами, после испытаний приобрел более округлые формы.

Таблица 2

Влияние морозного выветривания на гранулометрический состав (%) горной массы доломитовой подушки в основании сооружений Балаковской АЭС

Число циклов МРВ	Содержание фракций, %						
	> 40 мм	20–40 мм	10–20 мм	5–10 мм	3–5 мм	1–3 мм	< 1 мм
0	7,9	92,1	0	0	0	0	0
50	7,8	85,7	3,2	1,03	0,47	0,52	1,28
100	7,8	82,6	3,52	2,05	0,99	1,03	2,01
185	7,45	80,0	5,4	2,55	1,0	1,5	2,1
817	3,04	71,4	11,86	6,58	1,82	1,82	3,48
1480	–	64,6	16,5	7,2	0,80	2,70	8,2

3. Известняки доломитизированные каледонского структурного этажа (ордовик, силур) [13] широко используются в Ленинградской области как строительный материал (Гатчинский дворец, малые ГЭС Ленинградской области и др.). Характеристики образцов пород Елизаветинского месторождения следующие [13]: $\rho_d = 2,26-2,45 \text{ г/см}^3$, $n = 14,3-20,8 \%$, $R_c = 33-91 \text{ МПа}$; характеристики горной массы: $E_{\text{деф}} = 28-47 \text{ МПа}$, коэффициент трения 0,97, сцепление 100 кПа [1].

Таблица 3

Влияние морозного выветривания, выветривания увлажнения-высыхания и температурного выветривания на гранулометрический состав (%) горной массы доломитизированных известняков (Ленинградская область)

Число циклов	МРВ ВУВ ТВ	Содержание фракций, %						
		40–80 мм	20–40 мм	10–20 мм	5–10 мм	3–5 мм	1–3 мм	< 1 мм
0	МРВ	84	16					
	ВУВ	84	16	–	–	–	–	–
	ТВ	75	25					
100	МРВ	11,5	10,5	24	25	15	5	9
200	МРВ	2,27	3,17	8,58	68,44	17,54	–	–
500	МРВ	0	1	3,0	6	14	40	36
1000	МРВ	0	0,4	1,6	5,0	13	34	46
	ВУВ	82,5	15,6	0,5	0	0	0,5	0,9
2455	МРВ	0	0,2	0	2,5	6,4	40	50,9
4725	МРВ	0	0	0	0,5	4,5	41	54
	ВУВ	65	15	5	3	2	2	8
	ТВ	71,6	26	0	0	0,4	0,6	1,4

В опытах на МРВ и ВУВ изучалась горная масса размером 40–80 мм (84 %) и 20–40 мм (16 %), а на ТВ – 40–80 мм (75 %) и 20–40 мм (25 %). Было выполнено 4725 циклов. Результаты определения гранулометрического состава приведены в табл. 3. Анализ этих данных приводит к следующим выводам:

1) грансостав горной массы доломитизированных известняков устойчив к ТВ и ВУВ, но сильно изменчив при МРВ, в частности, после 500 ЦЗО преобладают мелкие фракции 1–3 мм и менее 1 мм (76 %), после 4725 циклов их содержание 95 %, а крупные фракции отсутствуют. Интересно, что фракция менее 1 мм (54 %) представлена следующими размерами: 0,5–1,0 мм (15 %), 0,25–0,5 мм (15 %), 0,1–0,25 мм (10 %), < 1 мм (14 %);

2) отдельности горной массы, имевшие в начале опытов на ВУВ многоугольную форму, после 4725 циклов стали овальными и уменьшились в размерах, причем исходные фракции сохранились на 80 %, а фракция менее 1 мм представлена глинистой массой (8 %);

3) после 4725 циклов ТВ отдельности сохранили свой состав, свою угловатую форму (при этом наиболее острые выступы сгладились), а пылеватая фракция (менее 1 мм) составила 1,4 %;

4) горная масса из доломитизированных известняков может быть использована во внутренних (аэрированных и обводненных) зонах каменно-набросных плотин.

Примеры дезинтеграции горной массы скальных пород после продолжительного выветривания увлажнения-высыхания приведены на рис. 9, 10.



Рис. 9. Гранулометрический состав горной массы доломитизированных известняков Ленинградской области после 4725 циклов увлажнения-высыхания (с исходными фракциями при 0 циклов – 20–80 мм).

Во фракцию < 5 мм входят: 5–3 мм – 2 %, 3–1 мм – 2 %, < 1 мм – 8 %



Рис. 10. Гранулометрический состав горной массы метаморфизованных глинистых сланцев участка Усть-Среднеканской ГЭС на р. Колыме после 5027 циклов увлажнения-высыхания (при исходном гранулометрическом составе 20–80 мм)

Горная масса полускальных пород

1. Мергели участка Светлинской ГЭС (Виллойской ГЭС-3) относятся к кембрийским породам верхоленской свиты – засоленным (до 7 %), загипсованным, размягчаемым, низкопрочным. Они переслаиваются в основании сооружений с известняками, песчаниками и алевролитами. Поскольку мергели уже в начальный период изысканий были отнесены к «слабому звену» основания, то необходимо было оценить влияние основных факторов ФВ на их состояние и свойства.

Первые же опыты показали, что монолитные керны мергелей через 5–10 циклов замораживания-оттаивания и увлажнения-высыхания дезинтегрируют до состояния глины. Даже после 4 ЦЗО потеря массы при МРВ достигает 45 %, а при ТВ – 10 % (рис. 3).

Поэтому мергели участка Светлинской ГЭС не рекомендуются в качестве материала каменно-земляных и каменно-набросных плотин, в том числе внутренних аэрированных зон.

2. *Алевролиты алевроитовые участка Зираны ГЭС* (Дагестан, Северный Кавказ). Крупная фракция 40–80 мм была испытана на МРВ и ТВ (табл. 4). Было выполнено 5686 ЦЗО.

Если принять среднее число ЦЗО в год для этого района равным 80, то при МРВ через 1 год грунт потеряет признаки крупнообломочного, поскольку исходная фракция 40–80 мм перейдет во фракции менее 3 мм, а через 12 лет останется только фракция менее 1 мм.

Таблица 4

Влияние морозного и температурного выветривания на гранулометрический состав (%) горной массы алевролита алевроитовой структуры района Зираны ГЭС

Число циклов	МРВ ТВ	Содержание фракций %						
		40–80 мм	20–40 мм	10–20 мм	5–10 мм	3–5 мм	1–3 мм	< 1 мм
0		100/100	0	0	0	0	0	0
10	МРВ	0	0	0	0	4	84	12
	ТВ	10	65	10	12,5	2,5	0	0
50	МРВ	0	0	0	0	0	42	58
	ТВ	0	47,5	20	25	5	2,5	0
100	МРВ	0	0	0	0	0	14,2	85,8
	ТВ	0	0	41	46,6	8,3	3,7	0,4
550	МРВ	0	0	0	0	0	1,4	98,6
	ТВ	0	0	16	50	16,5	8	9,5
1000	МРВ	0	0	0	0	0	0	100
	ТВ	0	0	14	50,5	18	8	9,5
2000	МРВ	0	0	0	0	0	0	100
	ТВ	0	0	9,5	40	29	12	9,5
3000	ТВ	0	0	8,5	41	28	13	9,5
5686	ТВ	0	0	1	29	29	18	23

При ТВ через 1 год еще сохраняются крупные фракции 10–20 мм (41 %), 5–10 (46,6 %), 3–5 мм (8,3 %), а через 70 лет этих фракций останется 59 %.

Поэтому алевролиты алевроитовые являются неустойчивыми к факторам ФВ и в качестве горной массы не могут быть рекомендованы в составе каменно-земляных и каменно-набросных плотин, хотя могут использоваться во внутренних аэрированных зонах.

Заключение

1. Скальные, полускальные и крупнообломочные горные породы как строительный материал в гидротехническом, дорожном и гражданском строительстве на территории России подвержены факторам физического выветривания: морозного, увлажнения-высыхания и температурного. С целью оценки влияния ФВ на состояние и свойства этих пород, представленных сотнями образцов, авторами были выполнены в 1975–2023 гг. длительные циклические испытания (до 6757 циклов).

2. Проанализированы результаты экспериментов с количественной оценкой потери массы образцов различных пород (изверженных, метаморфических, осадочных) и изменения гранулометрического состава крупнообломочных грунтов. Для областей России с умеренным и холодным климатом оценена роль каждого фактора ФВ в процессе деструкции и дезинтеграции грунта (МРВ до 60–80 %, ВУВ до 25–40 %, ТВ до 2–7 %) в зависимости от вида (разновидности) породы.

3. Показана пригодность горной массы изверженных и метаморфических пород во внешних и внутренних зонах грунтовых плотин и необходимость экспериментального обоснования использования горной массы осадочных скальных пород. Полускальные размокающие породы (мергели, аргиллиты и др.) в большинстве случаев малопригодны в составе каменно-земляных и каменно-набросных плотин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Воронков О.К., Ушакова Л.Ф.** Влияние физического выветривания на состояние и свойства горных пород. СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2007. 154 с.

2. **Воронков О.К., Ушакова Л.Ф.** К прогнозу морозного выветривания и морозостойкости скальных пород на территории СССР // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1980. Т. 137. С. 86–92.

3. **Воронков О.К., Ушакова Л.Ф.** Закономерности дезинтеграции скальных и крупнообломочных пород под воздействием физического выветривания // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1996. Т. 235. С. 25–45.

4. **Воронков О.К., Ушакова Л.Ф.** Экспресс-методика долгосрочного прогноза изменений гранулометрического состава крупнообломочных грунтов под влиянием температурно-влажностных воздействий // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2001. Т. 239. С. 87–98.

5. **Воронков О.К., Ушакова Л.Ф., Воронков В.О.** Экспресс-методика долгосрочного прогноза дезинтеграции крупнообломочных грунтов под влиянием природных и техногенных температурно-влажностных воздействий // Криосфера Земли. 2003. Т. 7. № 1. С. 76–83.

6. **Hallet B.** The breakdown of rock due to freezing a theoretical model // Proceeding 4th International Conference Permafrost. Washington, 1983. P. 433–438.

7. **Ершов Э.Д.** Криолитогенез. М.: Недра, 1982. 211 с.

8. **Guillien Y., Lautridou I.-P.** Conclusions des recherches de gelifraction expérimentale sur les calcaires des Charentes // Bull centre Géomorphol CNRS Caen. 1974. № 19. P. 25–33.

9. **Nagai M., Aoki S., Van K.** Long-term durability of riprap materials for rock-fill dams // Dix-septieme Congres des Grands Barrages Vienne. 1991. P. 321–338.

10. Swantesson J. Preliminary results from experimental weathering studies // *Fennia*. 1985. Vol. 163. № 2. P. 303–307.
11. Яковлева Е.А., Целиков Ф.И. Прогнозирование состояния легковыветривающихся скальных пород в откосах выемок // *Транспортное строительство*. 1973. № 12.
12. Шадунц К.Ш., Осенняя Е.Д., Зооз Э.Б. Исследование процесса выветривания юрских аргиллитов в лабораторных условиях // *Генетические основы инженерно-геологического изучения горных пород: труды международной конференции*. М.: Изд-во МГУ, 1975. С. 381–392.
13. **Инженерная геология СССР**. Т. 1. Русская платформа. М.: Изд-во МГУ, 1978. 528 с.

REFERENCES

1. Voronkov O.K., Ushakova L.F. The effect of physical weathering on the condition and properties of rocks. Saint Petersburg: VNIIG B.E. Vedeneeva Publ.; 2007. 154 p. (In Russ.).
2. Voronkov O.K., Ushakova L.F. To the forecast of frost weathering and frost resistance of rocks on the territory of the USSR. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 1980;137:86-92. (In Russ.).
3. Voronkov O.K., Ushakova L.F. Patterns of disintegration of rocky and very coarse rocks under the influence of physical weathering. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 1996; 235:25-45. (In Russ.).
4. Voronkov O.K., Ushakova L.F. Express method of long-term prediction of changes in the granulometric composition of very coarse soils under the influence of temperature and humidity influences. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2001;239:87-98. (In Russ.).
5. Voronkov O.K., Ushakova L.F., Voronkov V.O. Proximate procedure for long-term prediction of disintegration of coarse-clastic rock under naturel and technogenic temperature and moisture effects. *Kriosfera Zemli*. 2003;7(1):76-83. (In Russ.).
6. Hallet B. The breakdown of nock due to freezing a theoretical model. *Proceeding 4th International Conference Permafrost*. Washington; 1983. P. 433-438.
7. Ershov E.D. Cryolithogenesis. Moscow: Nedra; 1982. 211 p.
8. Guillien Y., Lautridou I.-P. Conclusions des recherches de gelifraction experimentale sur les calcaires des Charentes. *Bull centre Géomorphol CNRS Caen*. 1974;19:25-33.
9. Nagai M., Aoki S., Ban K. Long-term durability of riprap materials for rockfill dams. *Dix-septieme Congres des Grands Barrages Vienne*. 1991:321-338.
10. Swantesson J. Preliminary results from experimental weathering studies. *Fennia*. 1985;163(2):303-307.
11. Yakovleva E.A., Tselikov F.I. Forecasting the state of easily eroding rocks in the slopes of recesses. *Transportnoye stroitel'stvo – Transport construction*. 1973;12. (In Russ.).
12. Shadunts K.Sh., Osennaya E.D., Zoоз E.B. Investigation of the weathering process of Jurassic mudstones in laboratory conditions // *Genetic foundations of engineering-geological study of rocks: proceedings of the International conference*. Moscow: MSU Publishing House, 1975. P. 381–392. (In Russ.).
13. *Engineering Geology of the USSR*. Vol. 1. Russian Platform. Moscow: MSU Publishing House, 1978. 528 p. (In Russ.).

Информация об авторах

О.К. Воронков – доктор геол.-мин. наук, главный научный сотрудник – консультант;

Л.Ф. Ушакова – научный сотрудник.

Information about the authors

O.K. Voronkov – Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Chief Researcher – Consultant;

L.F. Ushakova – Research Fellow.

Статья поступила в редакцию 03.07.2023; одобрена после рецензирования 19.07.2023; принята к публикации 27.09.2023.

The article was submitted 03.07.2023; approved after reviewing 19.07.2023; accepted for publication 27.09.2023.

Научная статья
УДК 628.5

ОПЫТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ПРОИЗВОДСТВА В КАЧЕСТВЕ КОМПОНЕНТОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Елена Викторовна Чернышева¹, Александр Станиславович Сольский²

^{1,2} ООО «НПК Проектводстрой», Санкт-Петербург, Россия, pvs@proektvodstroj.ru

Аннотация. Рассматривается проблема накопления промышленных отходов в России. Предложено решение повторного использования отходов в промышленности для технической рекультивации нарушенных земель. Дана правовая оценка перевода отходов в побочный продукт. Описан практический пример применения отходов производства в качестве побочной продукции для изготовления инертного материала, который используется для отсыпки чаши шламонакопителя на этапе технической рекультивации. Это не только снижает объем образования отходов на предприятии, но и позволяет уменьшить использование карьерных инертных материалов.

Ключевые слова: отходы, побочный продукт, шламонакопитель, инертный материал, рекультивация, промышленные предприятия

Для цитирования: Чернышева Е.В., Сольский А.С. Опыт обеспечения возможности использования побочных продуктов производства в качестве компонентов строительных материалов в гидротехническом строительстве // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 309. С. 119–129.

Original article

EXPERIENCE OF ENSURING THE POSSIBILITY OF USE OF PRODUCTION WASTE AS COMPONENTS OF BUILDING MATERIALS IN HYDRAULIC ENGINEERING CONSTRUCTION

Elena V. Chernysheva¹, Aleksandr S. Solsky²

^{1,2} Research and Production Corporation Projectvodstroy LLC, Saint Petersburg, Russia,
pvs@proektvodstroj.ru

Abstract. The problem of industrial waste accumulation in Russia is considered. A solution for the reuse of industrial waste for the technical reclamation of disturbed lands is proposed. A legal assessment of the change in the status of waste to a by-product has been carried out. A practical example of the use of industrial waste as a by-product for the manufacture of an inert material, which is used for dumping the sludge pond at the stage of technical reclamation, is described. This reduces the amount of waste generated at the enterprise and the use of quarry inert materials.

Key words: waste, by-product, sludge pond, inert material, reclamation, industrial enterprises

For citation: Chernysheva E.V., Solskiy A.S. Experience of ensuring the possibility of use of production waste as components of building materials in hydraulic engineering construction. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;309:119-129. (In Russ.).

Введение

На территории Российской Федерации находится несколько тысяч гидротехнических сооружений (ГТС) специального назначения – хвостохранилища, шламохранилища, шламонакопители, гидроотвалы, илонакопители и другие накопители промышленных жидких отходов. Почти все они включены в государственный реестр объектов размещения отходов (ГРОРО). Часть из них исчерпали срок своей проектной эксплуатации, заполнены до проектных отметок (а в некоторых случаях и выше) и подлежат ликвидации с последующей рекультивацией.

Для рекультивации таких гидротехнических сооружений, а точнее для технического этапа рекультивации, требуется значительный объем инертных строительных материалов. Материалы необходимы для вытеснения воды из зоны отстойных прудов, восполнения объемов просадок накопленных иловых или шламовых масс, проведения работ по образованию территории и планировочных насыпей. Потребность в таких материалах для некоторых объектов измеряется миллионами кубических метров, и применять для их рекультивации карьерные инертные материалы (преимущественно песок) крайне нерационально.

Естественно, напрашивается мысль об использовании других материалов – побочных продуктов производств, которые часто, в соответствии с Федеральным классификационным каталогом отходов (ФККО), являются отходами. К тому же, в 2014 г. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Минприроды РФ) разъяснило [1], что рекультивация с использованием отходов фактически является размещением (захоронением) отходов, и с тех пор неизменно придерживается данной позиции.

Объем накопленных отходов в России

Количество производственных отходов, которые генерируют российские компании, практически непрерывно растет из года в год. Согласно отчетам предприятий, в 2021 г. было произведено 8,45 млрд т отходов [2], что является максимальным значением за весь период доступной статистики с 2002 г.

На графике (рис. 1) приведена статистика по производству отходов, которые генерируют только промышленные предприятия. Всего, по данным Росприроднадзора, на конец 2021 г. в России было накоплено 53 млрд т промышленных отходов [3].

Помимо ежегодного образования отходов предприятий, существуют и объекты накопленного экологического ущерба. Согласно инвентаризации накопленного экологического ущерба, проведенной Минприроды РФ и Росприроднадзором, в России выявлено 340 таких объектов [4], или 80 тыс. га загрязненных земель. Это не только ГТС специального назначения, но и полигоны ТКО, для рекультивации которых также необходимы большие объемы инертных материалов. Из российских городов за 2021 г. было вывезено 47,4 млн т твердых коммунальных отходов (ТКО) [5], большая часть из которых размещается на полигонах.

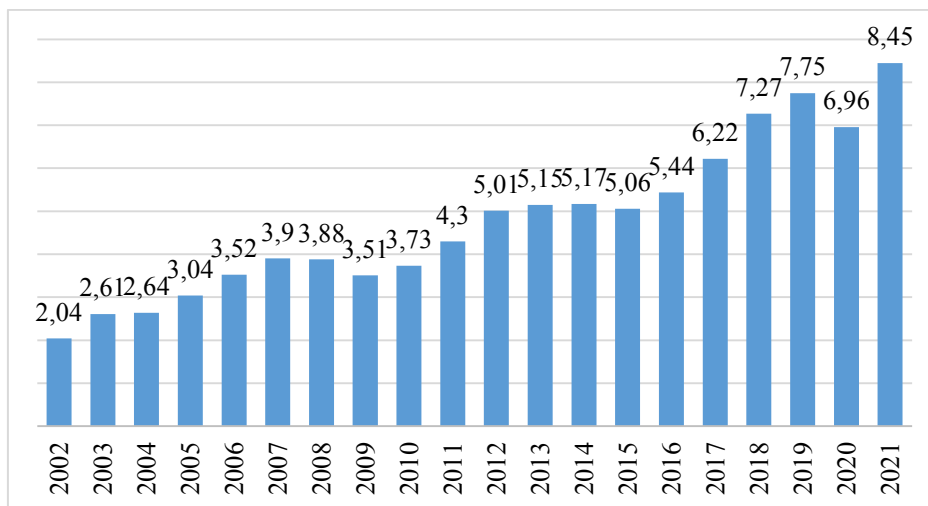


Рис. 1. Образование отходов предприятий по годам, 2002–2021 гг., млрд т

Сложившаяся в Российской Федерации практика обращения с отходами ведет к увеличению антропогенной нагрузки и негативной динамике состояния окружающей среды в районах размещения полигонов. В то же время низкий уровень использования отходов в качестве вторичных ресурсов приводит к нерациональному повышенному расходу природных ресурсов.

Обоснование возможности использования отходов

В связи с изложенным ставится вопрос об обосновании и обеспечении возможности использования отходов производства в качестве компонентов строительных материалов при полном соблюдении действующего законодательства в области охраны окружающей среды.

С точки зрения заявленной нами задачи использования этих материалов в процессе ликвидации гидротехнических сооружений предъявляются некоторые требования к физико-механическим характеристикам используемых строительных материалов, обеспечивающим после выполнения рекультивационных работ их стабильное состояние, возможность в дальнейшем выполнить гидроизоляционный экран и биологический этап рекультивации.

В некоторых случаях могут быть предъявлены требования к обеспечению таких физико-механических характеристик, которые в перспективе позволят использовать образованный геотехнический массив в качестве основания для размещения на высвободившихся при ликвидации ГТС территориях различных инфраструктурных элементов – проездов, площадок, временных или постоянных построек, зданий и сооружений, в том числе спортивных, игровых сооружений и т. п.

Существует большое количество прецедентов перевода отходов в продукцию, в том числе подтвержденных судом. Также наметилась тенденция по либерализации государственного регулирования в части законодательства об отходах.

Как известно, под отходами производства и потребления понимаются вещества или предметы, которые образованы в процессе производства,

выполнения работ, оказания услуг или в процессе потребления, которые удаляются, предназначены для удаления или подлежат удалению [6, ст. 1].

При этом данные вещества или предметы будут отнесены к отходам или продукции в зависимости от того, как сам природопользователь определяет дальнейшую судьбу образуемых веществ или предметов (например, размещает в целях их последующего захоронения, обезвреживания или использования) [7].

То есть хозяйствующему субъекту дается право самостоятельно определять, что именно является отходом в результате его производственной деятельности с учетом требований действующего законодательства, в первую очередь природоохранного, а также проектных материалов, информации из ФККО, государственных стандартов, собственных технологических регламентов, государственных и отраслевых стандартов для конкретного вида производства и т. д.

Помимо отходов производства на предприятии имеются и побочные продукты, к которым можно отнести дополнительную продукцию, которая образуется при производстве основной продукции и не является целью данного производства [8, п. 3.16; 9, п. 2.127]. Побочные продукты, как правило, используются как сырье в другом производстве или для потребления в виде готовой продукции. При этом побочный продукт не относится к отходам производства. В то же время отходы, образующиеся в результате производственной и иной деятельности, при наличии соответствующих технических условий могут быть реализованы как продукция для производства работ, оказания услуг.

Подтверждение соответствия продукции техническим регламентам, стандартам, сводам правил осуществляется в соответствии с Федеральными законами: от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» и от 30 марта 1999 г. № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения».

Следовательно, образующиеся отходы можно отнести к продукции при соблюдении следующих условий [10]:

1) предприятие использует отход (побочный продукт) в собственном производственном процессе (например, в качестве удобрения, строительного материала) и (или) продает в качестве товара другим лицам;

2) предприятие в своей технической документации, а также в иных документах не отражает образование отходов, а описывает процесс производства продукции (товара) и разрабатывает на нее технические условия;

3) предприятие соблюдает требования, установленные Федеральными законами № 184-ФЗ, 7-ФЗ, 52-ФЗ и иными нормативными актами.

В качестве одного из примеров либерализации государственного регулирования можно привести закон, направленный на стимулирование вовлечения полезных компонентов отходов в хозяйственный оборот, который был одобрен Государственной думой в июле 2022 г. (вступил в силу с 1 марта 2023 г.) [11]. Он вводит понятия «вторичных ресурсов», «вторичного сырья» и «побочных продуктов».

Кроме того, закон закрепил общее правило, согласно которому побочные продукты производства не признаются отходами. В данном случае законодатель учел существующую практику, когда получаемый в произ-

водственной деятельности побочный продукт используется в качестве сырья в собственном производстве, а также потребляется или реализуется в качестве готовой продукции. Также закреплено на законодательном уровне, что предприятие вправе самостоятельно относить образованные вещества и предметы к отходам либо побочным продуктам производства вне зависимости от их включения в ФККО.

Применение инертного материала в качестве побочного продукта

Хотелось бы отметить, что авторами ведется работа в данном направлении, ниже представлен пример разработки строительного материала из отходов (побочных продуктов) производства для рекультивации шламонакопителя.

Гидротехнические сооружения шламонакопителя предназначены для сбора и транспортирования с промплощадки производственных шламовых вод и возврата осветленной воды в цех биологической очистки сточных вод (ЦБОСВ).

В период эксплуатации шламонакопителя поступившие первичные осадки и избыточный ил отстаиваются, уплотняются, подвергаются аэробно-анаэробному сбраживанию; образовавшаяся в этих процессах отстоянная вода отводится через водосбросной колодец в водоотводящий самотечный коллектор на главную насосную станцию ЦБОСВ для дальнейшей очистки.

В состав гидротехнических сооружений наливного односекционного шламонакопителя равнинно-косогорного типа входят:

1. Ограждающая дамба из местных грунтов длиной 3430 м, высотой 2,5–9,5 м, шириной по гребню 5,0 м.
2. Железобетонный водосбросный колодец шандорного типа 1,0×1,0 м.
3. Дренажная канава длиной 3500 м.
4. Коллектор осветленной воды $D = 530$ мм.
5. Пульпопровод, состоящий из двух нитей $D = 200$ мм, длиной 3600 м.

На момент проектирования осадки сточных вод обезвоживались в ЦБОСВ и шламонакопитель выполнял функцию резервного, в связи с чем было принято решение о его ликвидации. Разработанный проект рекультивации предусматривал: демонтаж подводящего водовода, ремонт дорог до шламонакопителя, засыпку емкости шламонакопителя инертным материалом, устройство защитного противофильтрационного экрана с разуклонкой, демонтаж дублирующего и существующего водосбросных колодцев, тампонаж трубопровода на участке между колодцами и отводящего водовода и благоустройство территории в границах проектирования.

Объем инертных материалов, необходимый для реализации технического этапа ликвидации ГТС, составил 4,5 млн м³. Засыпка чаши шламонакопителя осуществлялась в три этапа с послойным уплотнением. Начиная с первого, инертные материалы отсыпались послойно друг на друга. Для отведения поверхностного стока на строительный период в материалах засыпки устраивались водоотводные канавки с уклоном в сторону дублирующего колодца.

Для этапа технической рекультивации были проанализированы образующиеся на предприятии отходы и составлен перечень возможных для

производства инертных материалов. По результатам дальнейших изучений были выбраны отходы, которые стали сырьем для производства инертного материала «АРБОЛ». Наиболее близким нормативным документом, который описывает изготовление этого материала, является ГОСТ Р 54854-2011 «Бетоны легкие на органических заполнителях растительного происхождения. Технические условия».

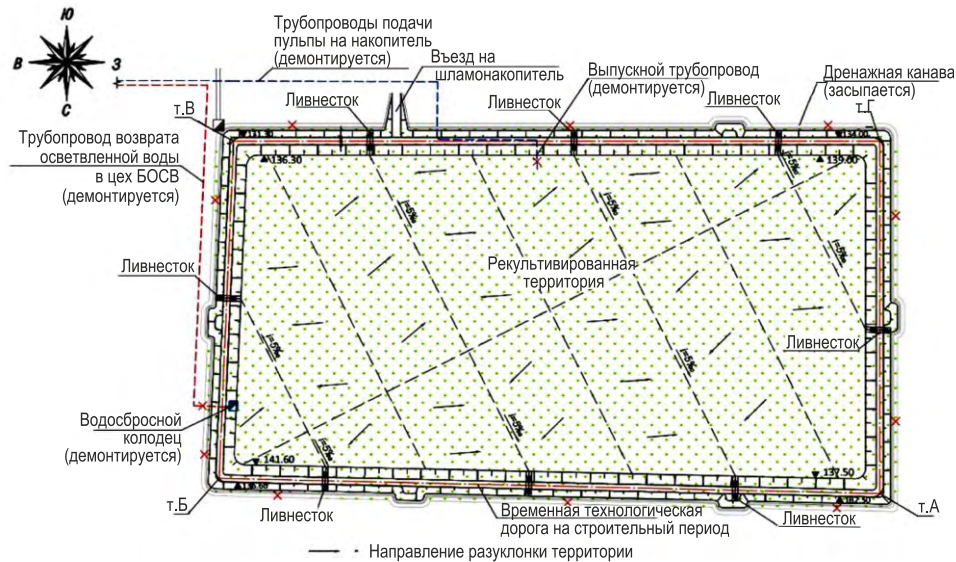


Рис. 2. Схема ГТС шламонакопителя после ликвидации и рекультивации территории

Данный стандарт устанавливает требования к арболитовым смесям, готовым для применения, затвердевшей арболитовой смеси (арболиту), материалам для их приготовления, а также правила приемки и методы испытаний.

Арболитовая смесь – это легкобетонная смесь, получаемая в результате перемешивания подобранной композиции, состоящей из минерального цементного вяжущего, органических заполнителей растительного происхождения (измельченные отходы производства лесозаготовок, лесопиления и деревообработки, дробленые стебли хлопчатника и рисовой соломы, костра конопли и льна), химических и минеральных добавок, а также воды.

На основе ГОСТ Р 54854-2011 были разработаны технические условия, регламентирующие процесс производства и использования продукции.

В качестве цементно-вяжущего смеси были выбраны:

зола от сжигания древесного топлива практически неопасная (код ФККО: 6 11 900 02 40 5)

известь (отходы каустизации зеленого щелока известью при производстве целлюлозы, код ФККО: 3 06 111 31 40 4).

Известково-зольным цементом называется гидравлическое вяжущее вещество, получаемое либо совместным помолом сухой топливной золы или шлака с известью (негашеной, гашеной или гидравлической), либо тщательным смешением в сухом виде тех же отдельно измельченных материалов [12].

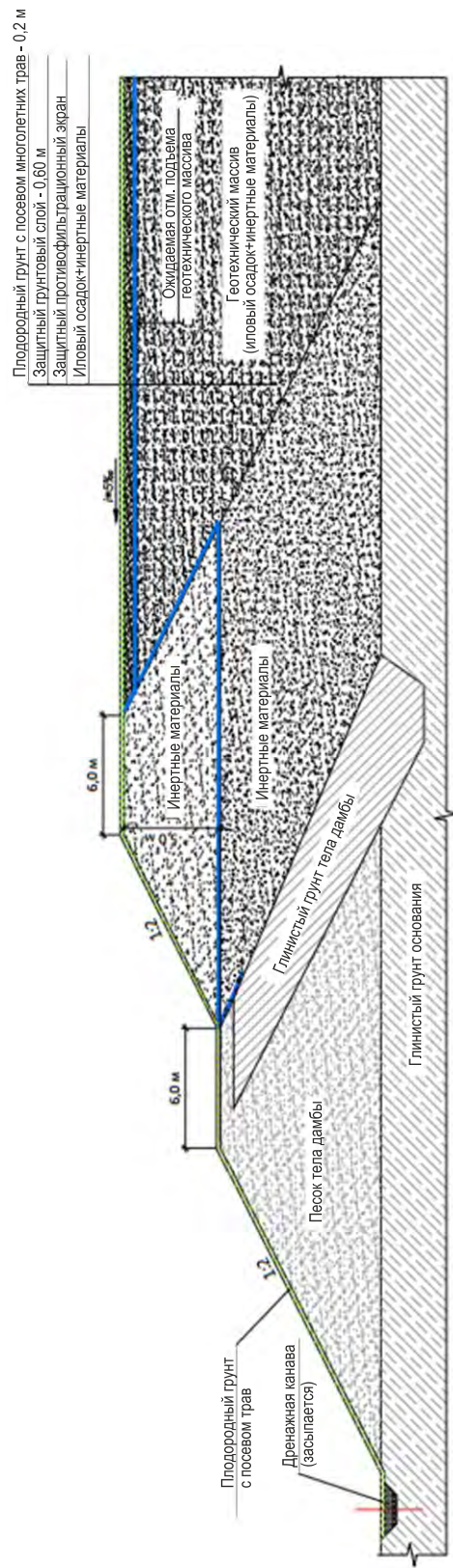


Рис. 3. Разрез по дамбе после ликвидации ГТС и рекультивации территории

В основной своей массе зола представлена кремнеземсодержащими составляющими с повышенным, по сравнению с составом природных кремнеземов, содержанием соединений кальция и магния. Это решает задачу при ее использовании в составе сырьевой смеси для изготовления легких бетонов.

Повышение гидравлической активности и ускорение твердения золы как основного вяжущего достигается путем введения 5–20 % извести. В этом случае, кроме повышения общей гидравлической активности зольного вяжущего за счет введения извести, наблюдается еще и дополнительный эффект – частицы этих гидравлически высокоактивных веществ раздвигают зерна золы, чем обеспечивается облегчение доступа воды и, соответственно, интенсификация гидратационных процессов [13].

В качестве органического заполнителя были выбраны отходы окорки древесины практически безопасные (код ФККО: 3 05 111 11 20 5).

Это органическое сырье эффективно используется в качестве крупного заполнителя легкого бетона для создания пористой структуры. Свойства такого заполнителя обеспечивают необходимую прочность образуемого геотехнического массива и обладают достаточной пористостью для вмещения в свой скелет сапропелитовых илов.

Технологический процесс изготовления инертного материала «АРБОЛ» разделяется на несколько этапов. Изначально осуществляется раскладка компонентов (кора, зола, известь, песок, смет) в отдельные отвалы на специальной площадке с твердым покрытием. Исходное сырье (золу) необходимо охладить до температуры не выше 20 °С на открытом воздухе.

На следующем этапе происходит смешение отдельных отвалов в один с раскладкой тонкими слоями бульдозером, с последующей перегрузкой смеси в автосамосвал экскаватором. Далее, после выгрузки смеси на площадке производства работ, ее транспортируют бульдозерами на место укладки, отсыпки и разравнивания.

После разравнивания смесь заправляется водой, в случае укладки в обводненные места этот этап пропускают. На завершающем этапе смесь уплотняется катками или многократной проходкой тяжелой гусеничной техники до получения механически стабильного основания.

В последующем соответствие инертного материала «АРБОЛ» заявленным характеристикам было неоднократно подтверждено протоколами испытаний аккредитованных независимых лабораторий, а также выпуском сертификата соответствия.

Многолетний мониторинг степени загрязнения грунтовых вод, почв и атмосферного воздуха в районе шламонакопителя выявил общую тенденцию уменьшения количества загрязняющих веществ. Наблюдается положительная динамика по снижению концентраций тяжелых металлов в почвогрунтах объекта.

По результатам исследований проб почвы, проведенных в 2021 г. на территории шламонакопителя, превышений допустимых концентраций загрязняющих веществ не наблюдается.

В атмосферном воздухе содержание сероводорода, диоксида азота и формальдегида над участком шламонакопителя и на границе его санитарно-защитной зоны (СЗЗ) не превышает значения максимальной разовой

предельно допустимой концентрации (ПДК) в атмосферном воздухе для населенных мест.

Заключение

Выполнен анализ российского природоохранного законодательства на предмет возможности использования побочной продукции различных производств в гидротехническом строительстве, в частности создания геотехнического массива на этапе технической рекультивации при ликвидации гидротехнических сооружений.

На конкретном примере представлен алгоритм разработки инертного материала «АРБОЛ» с применением образующихся на предприятии побочных продуктов. По физико-химическим характеристикам данный материал можно применять для засыпки чаши шламонакопителя на этапе технической рекультивации. В настоящее время на объекте ведутся работы по формированию геотехнического массива.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Письмо** Минприроды РФ от 19 мая 2014 г. № 05-12-44/10285 «О разъяснении законодательства по вопросу размещения отходов организациями, производящими добычу полезных ископаемых». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_155559/.
2. **Федеральная служба** государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oxr_otxod3.xls.
3. **Статистика** образования отходов. URL: <https://tass.ru/obschestvo/15246879>.
4. **Минприроды** России: Сведения, содержащиеся в государственном реестре объектов накопленного вреда окружающей среде. URL: <https://nangs.org/docs/minprirody-rossii-svedeniya-soderzhashchiesya-v-gosudarstvennom-reestre-obektov-nakoplennogo-vreda-okruzhayushchej-srede>.
5. **Накопление** мусора в российских городах уменьшилось на 4,4% / FinExpertiza. URL: <https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2022/nakop-musora/>.
6. **Федеральный закон** от 24.06.1998 № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» (в ред. от 27.12.2019). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/.
7. **Письмо** Минприроды России от 06.11.2013 № 05-12-44/21713 «По вопросу разъяснения применения природоохранного законодательства Российской Федерации при отнесении иловых осадков к отходам производства». URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=119223#rqRfHnT2bgJn9DIZ1>.
8. **ГОСТ 30772-2001**. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Термины и определения. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. 20 с.
9. **ГОСТ Р 56828.15-2016**. Наилучшие доступные технологии. Термины и определения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200140738>.
10. **Письмо** Минприроды РФ от 28 июля 2021 г. № 25-50/10539-ОГ «О рассмотрении обращения по вопросу продажи отходов I–IV классов опасности». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_335829/.
11. **Федеральный закон** от 14.07.2022 № 268-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» и отдельные законодательные акты Российской Федерации». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_421836/.

12. **Фоменко А.И.** Модифицирование вяжущего композита зольными отходами термической переработки древесины // Траектория научно-технологического развития России с учетом глобальных трендов: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 29 ноября 2019 г. Белгород: ООО Агентство перспективных научных исследований, 2019. С. 166–169. URL: <https://apni.ru/article/115-modifitsirovanie-vyazhushchego-kompozita>.
13. **Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В.** Химическая технология вяжущих материалов. М.: Высшая школа, 1980. 472 с.
14. **Сольский С.В., Ладенко С.Ю.** Проектирование водохозяйственных систем: гидроузлы и водохранилища. СПб.: Лань, 2017. 288 с.
15. **Федеральный закон** от 21 июля 1997 г. № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» (с изменениями и дополнениями). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15265/.
16. **Сольский С.В., Зеленский И.Г.** Актуальные конструктивные решения накопителей грунтовых материалов и отходов горно-обогатительных предприятий // Гидротехника. 2022. № 3. С. 56–61.
17. **Правила** безопасности гидротехнических сооружений накопителей жидких промышленных отходов (ПБ 03-438-02): утверждены Постановлением Госгортехнадзора России от 28.01.2002 № 6. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901815593?marker=6560Ю>.
18. **Сольский С.В., Стефанишин Д.В., Финагенов О.М., Шульман С.Г.** Надежность накопителей промышленных и бытовых отходов. СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2006. 300 с.

REFERENCES

1. Letter of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation dated May 19, 2014 No. 05-12-44/10285 «On clarification of legislation on the issue of waste disposal by organizations engaged in mining». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_155559/. (In Russ.).
2. Federal State Statistics Service. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oxr_otxod3.xls. (In Russ.).
3. Waste generation statistics. URL: <https://tass.ru/obschestvo/15246879>. (In Russ.).
4. Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation: Information contained in the State register of objects of accumulated environmental damage. URL: <https://nangs.org/docs/minprirody-rossii-svedeniya-soderzhashchiesya-v-gosudarstvennom-reestre-obektov-nakoplennogo-vreda-okruzhayushchej-srede>. (In Russ.).
5. The accumulation of garbage in Russian cities decreased by 4.4% / FinExpertiza. URL: <https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2022/nakop-musora/>.
6. National Law No. 89-FZ of June 24, 1998 «On Production and Consumption Waste» (as amended on 27.12.2019). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/. (In Russ.).
7. Letter of Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation dated November 06, 2013 No. 05-12-44/21713 «On the issue of explaining the application of the environmental legislation of the Russian Federation when referring sludge to industrial waste». URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=119223#rqRfHnT2bgJn9DIZ1>. (In Russ.).
8. GOST 30772-2001. Resources saving. Waste treatment. Terms and definitions. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov; 2002. 20 p. (In Russ.).
9. GOST R 56828.15-2016. Best available techniques. Terms and definitions. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200140738>. (In Russ.).
10. Letter of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation dated July 28, 2021 No. 25-50/10539-OG « On consideration of an appeal on

the sale of waste of hazard classes I–IV». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_335829/. (In Russ.).

11. National Law No. 268-FZ of July 14, 2022 «On amendments to the National Law «On Production and Consumption Waste» and certain legislative acts of the Russian Federation». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_421836/. (In Russ.).

12. Fomenko A.I. Modification of a binder composite with ash waste from thermal processing of wood // Trajectory of scientific and technological development of Russia taking into account global trends: collection of scientific papers on the materials of the International Scientific and Practical Conference on November 29, 2019. Belgorod: Agency for Advanced Scientific Research, 2019. P. 166–169. URL: <https://apni.ru/article/115-modifitsirovanie-vyazhushchego-kompozita>. (In Russ.).

13. Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V. Chemical technology of binding materials. Moscow: Vysshaya shkola, 1980. 472 p. (In Russ.).

14. Solsky S.V., Ladenko S.Yu. Design of water management systems: waterworks and reservoirs. Saint Petersburg: Lan'; 2017. 288 p. (In Russ.).

15. National Law No. 117-FZ of July 21, 1997 «On the safety of hydraulic structures» (with amendments and additions). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15265/. (In Russ.).

16. Solsky S.V., Zelensky I.G. Current design solutions for materials and wastes ponds of ore mining and processing plants // Hydrotechnika. 2022;3:56-61. (In Russ.).

17. Safety Rules for Hydraulic structures of Liquid Industrial Waste Storage Facilities (PB 03-438-02): approved by the Resolution of the Gosgortekhnadzor of Russia No. 6 of January 28, 2002. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901815593?marker=6560IO>. (In Russ.).

18. Solsky S.V., Stefanishin D.V., Finagenov O.M., Shulman S.G. Reliability of industrial and household waste storage. Saint Petersburg: VNIIG B.E. Vedeneeva Publ.; 2006. 300 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Е.В. Чернышева – заместитель технического директора, начальник ИТО;
А.С. Сольский – инженер ИТО.

Information about the authors

E.V. Chernysheva – Deputy Technical Director, Head of the Engineering and Technical Department;

A.S. Solsky – Engineer of the Engineering and Technical Department.

Статья поступила в редакцию 17.07.2023; одобрена после рецензирования 02.08.2023; принята к публикации 27.09.2023.

The article was submitted 17.07.2023; approved after reviewing 02.08.2023; accepted for publication 27.09.2023.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Кузьменко А.П., Сабуров В.С.</i> Аналитические модели вертикальных колебаний пролётных строений мостовых сооружений	3
<i>Панов С.И., Штильман В.Б., Волков Е.В.</i> Хрупкое разрушение отдельностей горных пород в откосах каменно-земляных плотин на Севере	21
<i>Глазовский В.Б., Гибянская Е.Д.</i> О сопоставлении результатов оценки сейсмостойкости каменно-набросной плотины с экраном	39
<i>Васильев Н.К.</i> Ледяные и льдогрунтовые композиты. Исследования последних лет	56
<i>Охапкин Г.В., Бакановичус Н.С., Лялина А.А.</i> Актуальность защиты бетона гидротехнических сооружений от обледенений	70
<i>Штенгель В. Г.</i> Опыт комплексного обследования железобетонных конструкций ГТС, находящихся в длительной эксплуатации	79
<i>Воронков О.К., Ушакова Л.Ф.</i> Изменение состояния скальных и крупнообломочных грунтов при длительном физическом выветривании	102
<i>Чернышева Е.В., Сольский А.С.</i> Опыт обеспечения возможности использования побочных продуктов производства в качестве компонентов строительных материалов в гидротехническом строительстве	119

CONTENT

<i>Kuzmenko A.P., Saburov V.S.</i> Comparison of the results of dynamic and static tests of a two-span beam structure	3
<i>Panov S.I., Shtilman V.B., Volkov E.V.</i> The brittle destruction of rock parts in the slopes of rock-earth dams in the north	21
<i>Glagovsky V.B., Gibyanskaya E.D.</i> On the comparison of the results of the assessment of the seismic resistance of a rockfill dam with a screen	39
<i>Vasiliev N.K.</i> Ice and ice-soil composites. Research in recent years	56
<i>Okhapkin G.V., Bakanovich N.S., Lyalina A.A.</i> Relevance of concrete protection hydro-technical facilities from icing	70
<i>Shtengel V.G.</i> Experience of complex inspection of reinforced concrete structures of hydraulic structures in long-term operation	79
<i>Voronkov O.K., Ushakova L.F.</i> Changes in the state of the rocky and very coarse soils with prolonged physical weathering	102
<i>Chernysheva E.V., Sol'skiy A.S.</i> Experience of ensuring the possibility of use of production waste as components of building materials in hydro-engineering construction	119

**Перечень организаций, представивших статьи
для опубликования в сборнике научных трудов
«Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», т. 309**

АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия;

ООО «НПК Проектводстрой», Санкт-Петербург, Россия;

Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий (ФИЦ ИВТ), Новосибирск, Россия.

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ
ДЛЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ В СБОРНИКЕ НАУЧНЫХ ТРУДОВ
«ИЗВЕСТИЯ ВНИИГ им. Б.Е. ВЕДЕНЕЕВА»

Редакционной коллегией принимаются к публикации открытые для печати оригинальные статьи, нигде ранее не публиковавшиеся и не предназначенные для публикации в другом издании.

Статьи должны включать следующие основные элементы:
формулировка целей статьи (постановка задачи);
краткий анализ современных достижений по рассматриваемому вопросу;
изложение основного материала с анализом полученных результатов;
выводы, рекомендации для дальнейшего использования полученных результатов исследований.

Автор (авторы) предоставляют **Справку** (с подписями) о передаче прав издательству АО «ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева» на опубликование статьи в сборнике «Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» и с подтверждением, что статья ранее не публиковалась и не представлена для опубликования в другие издания, а также согласие на обработку персональных данных.

Специалисты из **сторонних организаций** сопровождают статью рекомендательным письмом от организации и **экспертным заключением** о возможности открытого опубликования.

Необходимо предоставить полные сведения о каждом авторе статьи: имя, отчество, фамилию полностью на русском языке и в транслитерированной форме на латинице; наименование организации, где работает или учится автор, и город, в котором она расположена; должность и ученая степень (при наличии); электронный адрес; открытый идентификатор ученого (ORCID) при наличии.

Если у статьи несколько авторов, указывается автор, ответственный за переписку (и в статье не приводятся электронные адреса других авторов). Имена всех авторов при публикации приводятся в принятой ими последовательности.

Заголовок статьи должен отражать ее содержание и быть по возможности кратким – не более 7–9 слов (не считая предлоги и союзы).

Статья должна сопровождаться краткой *аннотацией* объемом не более 250 слов, содержащей основные результаты исследования, и перечнем *ключевых слов* (не менее 3 и не более 15 слов (словосочетаний) в зависимости от объема текста).

Заголовок статьи, аннотация, ключевые слова должны быть продублированы на *английском языке*.

В начале статьи необходимо указать ее тип: научная, обзорная, дискуссионная и т.д.

Объем статьи не должен быть менее 8 и более 18 страниц формата А4, включая текст, рисунки, таблицы, список литературы (рекомендуемый объем статьи – от 9 000 до 25 000 знаков).

Текст статьи должен быть представлен в электронном виде (формат электронного документа – doc, docx).

Основной текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размером 11 пт с абзацным отступом (красная строка) 1 см, с одинарным межстрочным интервалом и выравниванием абзаца по ширине.

Заголовок статьи набирается шрифтом Arial размером 12 пт прописными буквами с выравниванием по центру строки.

Поля устанавливаются следующего размера: верхнее – 3,0 см, нижнее – 4,7 см, внутри и снаружи – 4,2 см.

Формулы следует набирать только в редакторе формул Microsoft Equation или MathType с выравниванием по центру, а их порядковые номера в круглых скобках с выравниванием по правому краю. Русские, греческие буквы набираются прямым шрифтом, латинские – курсивом.

Рисунки цветные и черно-белые. Каждый рисунок представляется в виде отдельного файла. В тексте приводятся ссылки на номера всех рисунков. Размер каждого рисунка не должен превышать 125×220 мм. Формат: TIFF, PSD, JPEG, разрешение для сканированных фотографий – 300 dpi.

Подписи к рисункам набираются шрифтом Times New Roman размером 9 пт с выравниванием по центру, представляются в виде отдельного файла. Подписи к рисункам должны быть продублированы на английском языке.

Таблицы. Текст таблицы набирается шрифтом размером 10 пт. Слово «Таблица» и ее номер набираются курсивом размером 10 пт и располагаются над заголовком таблицы с выравниванием по правому краю. Заголовки к таблицам набираются шрифтом Times New Roman жирным начертанием размером 10 пт с межстрочным интервалом один и выравниванием по центру без точки в конце заголовка.

Список литературы приводится в конце статьи. Порядковый номер ссылки указывается в соответствующей строке текста в квадратных скобках. Источники в библиографическом списке располагаются в порядке их упоминания в статье. В описании указывается: фамилии и инициалы авторов, название книги, статьи, сборника или журнала на русском языке и его перевод на английский язык, город, издательство, год издания, номер журнала, количество страниц.

Материал представляется в издательство по электронной почте.

Статьи направлять в издательство

АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» по адресу:

Россия, 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская 21, ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева.

Тел: (812) 535-88-56, (812) 493-93-41

E-mail: izvestia@vniig.ru

Научный редактор *В.Б. Глазовский*
Редакторы *Т.М. Бовичева, А.А. Ермолаева*
Компьютерная верстка *Н.Н. Седова*

Подписано к печати 27.09.2023.

Формат 70×108 1/16. Бумага типографская № 1. Печать цифровая.

Печ.л. 8,375. Усл.печ.л. 11,725. Тираж 300 (100). Заказ 34.

Издательство АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева».

Типография ООО «ПК Марка».

195220, Санкт-Петербург, Гжатская ул., 21.