

ISSN 1997-0935 (Print)
ISSN 2304-6600 (Online)
vestnikmgsu.ru

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 15 Выпуск 7/2020
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7

ISSN 1997-0935 (Print)
ISSN 2304-6600 (Online)
<http://vestnikmgsu.ru>

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 15. Выпуск 7
2020**

Основан в 2005 году,
1-й номер вышел в сентябре 2006 г.
Выходит ежемесячно

Сквозной номер 142

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 15. Issue 7
2020**

Founded in 2005,
1st issue was published in September, 2006.
Published monthly

«Вестник МГСУ» — рецензируемый научно-технический журнал по строительству и архитектуре, целями которого являются публикация, распространение результатов российских и зарубежных научных исследований для обеспечения широкого обмена научной информацией, формирования открытого информационного кластера в области строительной науки и образования, повышения международного авторитета российской строительной науки.

В основных тематических разделах журнала публикуются оригинальные научные статьи, обзоры, краткие сообщения, статьи по вопросам применения научных достижений в практической деятельности предприятий строительной отрасли, рецензии на актуальные публикации.

Тематические рубрики

- Архитектура и градостроительство. Реконструкция и реставрация
- Проектирование и конструирование строительных систем. Строительная механика. Основания и фундаменты, подземные сооружения
- Строительное материаловедение
- Безопасность строительства и городского хозяйства
- Гидравлика. Геотехника. Гидротехническое строительство
- Инженерные системы в строительстве
- Технология и организация строительства. Экономика и управление в строительстве
- Краткие сообщения. Дискуссии и рецензии. Информация

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26, корп. 8. Тел.: (495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: ric@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru
Тел.:	(499) 188-29-75
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	29.07.2020.
Подписан в свет	30.07.2020.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 14,32. Тираж 100 экз. Заказ № 101

Главный редактор

Валерий Иванович Теличенко, академик, первый вице-президент Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., проф. каф. строительства объектов тепловой и атомной энергетики, президент, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Заместители главного редактора

Евгений Валерьевич Королёв, д-р техн. наук, проф., зам. директора НОЦ «Нанотехнологии и наноматериалы», НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Елена Анатольевна Король, чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., зав. каф. жилищно-коммунального комплекса, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Редакционная коллегия

Петр Банашук, д-р, проф., Белостокский технологический университет, Республика Польша

Александр Тевьетевич Беккер, чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., директор инженерной школы, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», Дальневосточная региональная организация Российской академии архитектуры и строительных наук, Владивосток, Российская Федерация

Виталий Васильевич Беликов, д-р техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории гидрологии речных бассейнов, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Х.Й.Х. Броуэрс, проф., д.-инж. (технические науки, строительные материалы), Технический университет Эйндховена, Королевство Нидерландов (Голландия)

Анвер Идрисович Бурханов, д-р физ.-мат. наук, доц., зав. каф. физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Российская Федерация

Йост Вальравен, проф., д-р-инж. (технические науки, железобетонные конструкции), Технический университет Дельфта, Королевство Нидерландов

Йозеф Вичан, д-р, проф., Университет Жилина, Словацкая Республика

Забигнев Вуйчицки, д-р, проф., Вроцлавский технологический университет, Республика Польша

Катажина Гладушевска-Федорук, д-р техн. наук, проф., Белостокский технологический университет, Республика Польша

Милан Голицки, д-р, проф., Институт Клокнера Чешского технического университета в Праге, Чешская Республика

Рольф Катценбах, д-р-инж., проф., Технический университет Дармштадт, Федеративная Республика Германия

Дмитрий Вячеславович Козлов, д-р техн. наук, проф., зав. каф. гидравлики и гидротехнического строительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Марта Косор-Казербук, д-р техн. наук, проф., Белостокский технологический университет, Республика Польша

Руда Лийас, канд. экон. наук, профессор, Таллинский технический университет, Эстония

Мирослав Премров, д-р, проф., Мариборский университет, Республика Словения

Дмитрий Николаевич Силка, д-р экон. наук, доц., зав. каф. экономики и управления в строительстве, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Армен Завенович Тер-Мартirosян, д-р техн. наук, руководитель научно-образовательного центра «Геотехника», НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Редакция журнала

Ответственный секретарь научных журналов

Маргарита Владимировна Митькина

Корректор

Любовь Владимировна Светличная

Выпускающий редактор

Анна Александровна Дядичева

Дизайн и верстка

Александр Дмитриевич Федотов

Редакторы

Татьяна Владимировна Бердникова

Перевод на английский язык

Ольга Валерьевна Юденкова

Журнал включен в утвержденный ВАК Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук. Индексируется в РИНЦ, Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка», UlrichsWeb Global Serials Directory, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, RSCI (Russian Science Citation Index на платформе Web of Science), ResearchBib

Редакционный совет

Юрий Владимирович Алексеев, д-р архитектуры, проф., проф. каф. градостроительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Юрий Михайлович Баженов, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии вяжущих веществ и бетонов, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Николай Владимирович Баничук, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. лаб. механики и оптимизации конструкций, ИПМ им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Российская Федерация

Игорь Андреевич Бондаренко, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р архитектуры, проф., директор, Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «ЦНИИП Минстроя России» Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства (НИИ-ТИАГ), Москва, Российская Федерация

Наталья Григорьевна Верстина, д-р экон. наук, проф., зав. каф. менеджмента и инноваций, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Андрей Анатольевич Волков, председатель, член-корр., член президиума Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., проф. каф. информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Владимир Геннадьевич Гагарин, чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Российская Федерация

Александр Витальевич Гинзбург, д-р техн. наук, проф., зав. каф. информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Георгий Васильевич Есаулов, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р архитектуры, проф., проректор по научной работе, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский архитектурный институт (Государственная академия)» (МАРХИ), Москва, Российская Федерация

Михаил Николаевич Кирсанов, д-р физ.-мат. наук, проф. каф. робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»), Москва, Российская Федерация

Елена Юрьевна Куликова, д-р техн. наук, проф., каф. строительства подземных сооружений и шахт, каф. инженерной защиты окружающей среды, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»», Москва, Российская Федерация

Леонид Семенович Ляхович, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительной механики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», Томск, Российская Федерация

Андрей Александрович Морозенко, д-р техн. наук, доц., зав. каф. строительства объектов тепловой и атомной энергетики, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Владимир Александрович Орлов, д-р техн. наук, проф., зав. каф. водоснабжения и водоотведения, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Петр Ян Паль, д-р, проф., Технический университет Берлина, Федеративная Республика Германия

Андрей Будимирович Пономарев, д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительного производства и геотехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Российская Федерация

Олег Григорьевич Примин, д-р техн. наук, проф., зам. директора по научным исследованиям, АО «МосводоканалНИИпроект», Москва, Российская Федерация

Евгений Иванович Пупырев, почетный член Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., консультант каф. гидравлики и гидротехнического строительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Станислав Владимирович Соболев, д-р техн. наук, проф., проректор, зав. каф. гидротехнических и транспортных сооружений, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», Нижний Новгород, Российская Федерация

Михаил Юрьевич Слесарев, д-р техн. наук, проф., проф. каф. строительства объектов тепловой и атомной энергетики, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Юрий Андреевич Табунщиков, чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., проф., зав. каф. инженерного оборудования зданий и сооружений, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский архитектурный институт (Государственная академия)» (МАРХИ), Москва, Российская Федерация

Павел Александрович Хаванов, д-р техн. наук, проф., проф. каф. теплогазоснабжения и вентиляции, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Наталья Юрьевна Яськова, д-р экон. наук, проф., зав. каф. инвестиционно-строительного бизнеса, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Москва, Российская Федерация

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

Vestnik MGSU is a peer-reviewed scientific and technical journal whose aims are to publish and disseminate the results of Russian and foreign scientific research to ensure a broad exchange of scientific information, form an open information cluster in the field of construction science and education, enhance the international prestige of Russian construction science and professional education of various levels, introduce innovative technologies in the processes of training professional and scientific personnel in the construction industry and architecture.

The main thematic sections of the journal publish original scientific articles, reviews, brief reports, articles on the application of scientific achievements in the educational process and practical activity of enterprises in the construction industry, reviews of current publications.

Thematic sections

- Architecture and Urban Planning. Reconstruction and Refurbishment
- Construction System Design and Layout Planning. Construction Mechanics. Bases and Foundations, Underground Structures
- Construction Material Engineering
- Safety of Construction and Urban Economy
- Hydraulics. Geotechnique. Hydrotechnical Construction
- Engineering Systems in Construction
- Technology and Organization of Construction. Economics and Management in Construction.
- Short Messages. Discussions and Reviews. Information

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company "ASV Publishing House", 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: ric@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency "Informnauka", magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	29.07.2020

Editor-in-Chief

Valery I. Telichenko, Academician, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Deputy Editor-in-Chief

Evgeniy V. Korolev, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Elena A. Korol, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Editorial Board

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

Alexander T. Bekker, Far Eastern Federal University, Far Eastern Regional Branch of Russian Federation Academy of Architecture and Construction Sciences, Vladivostok, Russian Federation

Vitaliy V. Belikov, Water Problems Institute of Russian Federation Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

H.J.H. Brouwers, Eindhoven University of Technology, Kingdom of the Netherlands

Anver I. Burkhanov, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

Katarzyna Gładyszewska-Fiedoruk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

Milan Holický, Czech Technical University in Prague, Klokner Institute, Czech Republic

Rolf Katzenbach, Doctor of Engineering, Professor, Technical University of Darmstadt, Federal Republic of Germany

Marta Kosior-Kazberuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

Dmitry V. Kozlov, Moscow State University of civil engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

Roode Liias, PhD, Professor (construction economics and management) Tallin University of Technology, Estonia

Dmitry N. Silka, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Armen Z. Ter-Martirosyan, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),

Moscow, Russian Federation

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wrocław University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Executive secretary

in charge of research journals

Margarita V. Mitkina

Executive editor

Anna A. Dyadicheva

Editors

Tat'yana V. Berdnikova

Corrector

Lyubov' V. Svetlichnaya

Layout

Aleksandr D. Fedotov

Russian-English translation

Ol'ga V. Yudenkova

Editorial Council

Yuri V. Alekseev, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Nikolay V. Banichuk, A.Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of RAS, Moscow, Russian Federation

Yuri M. Bazhenov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Igor A. Bondarenko, Federal State Budgetary Institution "TsNIIP of the Ministry of Construction of Russian Federation", Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Development (NIITIAG), Moscow, Russian Federation

Vladimir G. Gagarin, Scientific-research Institute of building physics Russian Federation Academy of architecture and construction Sciences, Moscow, Russian Federation

Alexander V. Ginzburg, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Georgi V. Esaulov, Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russian Federation

Pavel A. Havanov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Boris. B. Khrustalev, Penza state University of architecture and construction, Penza, Russian Federation

Mikhail N. Kirsanov, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI), Moscow, Russian Federation

Elena Yu. Kulikova, National Research Technological University "MISiS", Moscow, Russian Federation

Leonid S. Lyakhovich, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russian Federation

Andrei A. Morozenko, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Vladimir A. Orlov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Peter J. Pahl, Berlin Technical University, Federal Republic of Germany

Andrey B. Ponomarev, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Oleg G. Primin, "MosVodoKanalNIIProekt" JSC, Moscow, Russian Federation

Evgeny I. Pupyrev, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Stanislav V. Sobol, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Mikhail Yu. Slesarev, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Yury A. Tabunschikov, Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russian Federation

Natalia G. Verstina, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Andrey A. Volkov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Yas'kova N. Yur'evna, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russian Federation

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

А.С. Пискун, Г.В. Ганец, Г.А. Аверченко

Методы натурного обследования железобетонного моста на примере моста через реку Косопаша	957
---	------------

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

А.А. Лунев

Механическая прочность золошлакового щебня угольных тепловых электростанций	968
--	------------

Е.О. Зеркаль, А.Ю. Калашников, А.Е. Лапинов, А.И. Тютюнков

Выявление внутренних дефектов бетонирования в теле монолитной фундаментной плиты по данным георадиолокационного обследования.	980
--	------------

Ву Динь Тхо, Е.А. Король

Влияние контактных слоев на трещиностойкость изгибаемых трехслойных конструкций.	988
---	------------

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

С.В. Самченко, О.В. Александрова, А.Ю. Гуркин

Свойства цементных композитов на основе известняка в зависимости от его гранулометрического состава	999
--	------------

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

И.И. Иваненко, Е.Я. Лапатына, П.И. Смирнов

Исследования разложения углеводов на реконструированных очистных сооружениях ОАО «Автодеталь»	1007
--	-------------

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Н.А. Анискин, А.М. Шайтанов

Строительство, конструкции и инновации плотин из малцементного бетона	1018
--	-------------

А.А. Гебрехивот, Д.В. Козлов

Assessment of applicability of MIKE 11-NAM hydrological module for rainfall runoff modelling in a poorly studied river basin (Оценка применимости гидрологического модуля MIKE 11-NAM для моделирования дождевого стока в малоизученном речном бассейне)	1030
---	-------------

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

О.А. Тезадова, Н.Н. Коршунова

Применение модульных конструкций и зданий при проектировании гостиничного комплекса в высокогорных районах (Джилы-Су)	1047
--	-------------

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ. ДИСКУССИИ И РЕЦЕНЗИИ. ИНФОРМАЦИЯ

С.И. Рогачко

Защитники отечества нашего	1056
---	-------------

Требования к оформлению научной статьи	1061
---	-------------

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Artem S. Piskun, Galina V. Ganets, Gleb A. Averchenko

**Methods of on-site inspection of a reinforced concrete bridge exemplified
by the bridge over the river Kosopasha. 957**

CONSTRUCTION SYSTEM DESIGN AND LAYOUT PLANNING. CONSTRUCTION MECHANICS. BASES AND FOUNDATIONS, UNDERGROUND STRUCTURES

Aleksandr A. Lunev

Mechanical strength of slag crushed stone generated at coal-fired thermal power plants 968

Evgeny O. Zerkal, Alexey Yu. Kalashnikov, Andrey E. Lapshinov, Aleksey I. Tyutyunkov

Using ground penetrating radars to detect internal defects in concrete foundation slabs. 980

Vu Dinh Tho, Elena A. Korol

Influence of contact layers on cracking resistance of bending three-layer structures 988

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Svetlana V. Samchenko, Olga V. Alexandrova, Anton Yu. Gurkin

**Properties of cement composites based on limestone depending
on their granulometric composition. 999**

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Irina I. Ivanenko, Elena Ya. Lapatina, Pavel I. Smirnov

**Research into decomposition of hydrocarbons at restructured treatment facilities
of Autodetail Open Joint Stock Company 1007**

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Nikolai A. Aniskin, Alexey M. Shaytanov

Low-cement concrete dams: construction, structures and innovations. 1018

Anghesom A. Ghebrehiwot, Dmitry V. Kozlov

**Assessment of applicability of MIKE 11-NAM hydrological module
for rainfall runoff modelling in a poorly studied river basin 1030**

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION.

Oksana A. Tezadova, Natalia N. Korshunova

**Application of modular structures and buildings
in the design of a hotel facility in high mountain areas (Gili-Su) 1047**

SHORT MESSAGES. DISCUSSIONS AND REVIEWS. INFORMATION

Stanislav I. Rogachko

Defenders of our fatherland 1056

Requirements for research paper design 1061

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

В научно-техническом журнале «Вестник МГСУ» публикуются научные материалы по проблемам строительной науки и архитектуры (строительство в России и за рубежом: материалы, оборудование, технологии, методики; архитектура: теория, история, проектирование, реставрация; градостроительство).

Тематический охват соответствует научным специальностям:

- 05.02.22 — Организация производства (строительство) (технические науки);
- 05.23.01 — Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);
- 05.23.02 — Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);
- 05.23.03 — Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки);
- 05.23.04 — Водоснабжение канализация, строительные системы охраны водных ресурсов (технические науки);
- 05.23.05 — Строительные материалы и изделия (технические науки);
- 05.23.07 — Гидротехническое строительство (технические науки);
- 05.23.08 — Технология и организация строительства (технические науки);
- 05.23.16 — Гидравлика и инженерная гидрология (технические науки);
- 05.23.17 — Строительная механика (технические науки);
- 05.23.19 — Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки);
- 05.23.20 — Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (технические науки, архитектура);
- 05.23.21 — Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (технические науки, архитектура);
- 05.23.22 — Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки, архитектура);
- 08.00.05 — Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности) (экономические науки).

По указанным специальностям журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. К рассмотрению и публикации в основных тематических разделах журнала принимаются аналитические материалы, научные статьи, обзоры, рецензии и отзывы на научные публикации по фундаментальным и прикладным вопросам строительства и архитектуры.

Все поступающие материалы проходят научное рецензирование (одностороннее слепое) с участием редсовета и привлечением внешних экспертов — активно публикующихся авторитетных специалистов по соответствующим предметным областям.

Копии рецензий или мотивированный отказ в публикации предоставляются авторам и в Минобрнауки России (по запросу). Рецензии хранятся в редакции в течение 5 лет.

Редакционная политика журнала базируется на основных положениях действующего российского законодательства в отношении авторского права, плагиата и клеветы, и этических принципах, поддерживаемых международным сообществом ведущих издателей научной периодики и изложенных в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (COPE).

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

In the scientific and technical journal “Vestnik MGSU” Monthly Journal on Construction and Architecture are published the scientific materials on construction science and architectural problems (construction in Russia and abroad; materials, equipment, technologies, methods; architecture: theory, history, design, restoration; urban planning).

The subject matter coverage complies with the approved list of scientific specialties:

Analytical materials, scientific articles, surveys, reviews on scientific publications on fundamental and applied problems of construction and architecture are admitted to examination and publication in the main topic sections of the journal.

All the submitted materials undergo scientific reviewing (double blind) with participation of the editorial board and external experts — actively published competent authorities in the corresponding subject areas.

The review copies or substantiated refusals from publication are provided to the authors and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (upon request). The reviews are deposited in the editorial office for 5 years.

The editorial policy of the journal is based on the main provisions of the existing Russian Legislation concerning copyright, plagiarism and libel, and ethical principles approved by the international community of leading publishers of scientific periodicals and stated in the recommendations of the Committee on Publication Ethics (COPE).

Методы натурного обследования железобетонного моста на примере моста через реку Косопаха

А.С. Пискун¹, Г.В. Ганец², Г.А. Аверченко³

¹ Фарм Дизайн; г. Санкт-Петербург, Россия;

² Альянс-Авто Трак; г. Санкт-Петербург, Россия;

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Натурный метод — это визуальный осмотр инженерного сооружения с целью выявления дефектов, повреждений и нарушений на обследуемом объекте с последующей выдачей рекомендаций по их устранению. Натурный метод обследования мостов является одним из основных, так как позволяет увидеть все дефекты, образовавшиеся на мостовых сооружениях в течение срока службы.

Материалы и методы. Обследованы конструкции моста через р. Косопаху на 5+910 км автодороги Паша – Свирица – Загубье в Волховском районе Ленинградской области. Для сбора информации и предварительного анализа использован натурный метод.

Результаты. Приведено описание конструкции элементов моста: покрытие ездового полотна, деформационные швы, ограждения безопасности, тротуары, перильные ограждения, гидроизоляция, водоотвод, подходы к мосту, пролетное строение, опорные части, опоры, конусы и подмостовая зона. Даны оценка состояния данных элементов моста на момент обследования, характеристика имеющихся дефектов и повреждений, оценка грузоподъемности пролетного строения. Установлено, что основные дефекты — выщелачивание бетона с оголением арматуры, трещины и сколы бетона, отсутствие ограждения безопасности, частичное разрушение перильных ограждений, обрушение конструкций укрепления конусов.

Выводы. На основании полученных результатов сформулированы рекомендации по дальнейшей эксплуатации сооружения. Также предложен комплекс мероприятий по устранению существующих нарушений и дальнейшей эксплуатации мостового сооружения. Рекомендован комплекс работ по ремонту отдельных узлов и конструкций: очистка от пыли и грязи элементов мостового полотна и тротуаров, устранение мелких повреждений железобетонных конструкций, берегоукрепительные работы по восстановлению конусов, установка ограждений безопасности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обследование моста, оценка грузоподъемности моста, железобетон, мост, натурное обследование, выявление дефектов моста, устранение дефектов, мостовые опоры, мостовое полотно, опорные части

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пискун А.С., Ганец Г.В., Аверченко Г.А. Методы натурного обследования железобетонного моста на примере моста через реку Косопаху // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 7. С. 957–967. DOI:10.22227/1997-0935.2020.7.957-967

Methods of on-site inspection of a reinforced concrete bridge exemplified by the bridge over the river Kosopasha

Artem S. Piskun¹, Galina V. Ganets², Gleb A. Averchenko³

¹ Farm Design; St. Petersburg, Russian Federation;

² Alliance-Auto Truck; St. Petersburg, Russian Federation;

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. An on-site inspection method is a visual examination of an engineering structure aimed at the detection of defects, damages, and disturbances of a construction facility and further issuance of recommendations for their elimination. An on-site inspection method is among the principal ones applied, as it serves to identify all defects of bridge structures during their service lives.

Materials and methods. The structures of the bridge over the Kosopasha river, located at the 5+910 km of the Pasha – Sviritsa – Zagubye motor road, the Volkhov District, Leningrad Region, were inspected. An on-site inspection method was applied to collect the information and perform the preliminary analysis.

Results. The co-authors described the construction of the bridge elements, including the road deck topping, expansion joints, the safety parapet, sidewalks, hand rails, water insulation, the drain line, the bridge approach, the span, bridge support structures, piers, the bridge abutment, and the under-bridge area. They analyzed the condition of these elements at the time of their inspection; they compiled a report on defects, damages and the bridge deck capacity. The main defects include concrete leaching accompanied by concrete reinforcement denuding, concrete cracking and chipping, absence of safety parapet, partial destruction of rails, and failure of abutment strengthening constructions.

Conclusions. Recommendations for the further operation of the bridge were formulated on the basis of inspection results. A set of measures is proposed with the purpose of eliminating the defects and further safe operation of the bridge structure. The recommendations include a set of repair works in respect of particular joints and constructions: removal of dust and dirt from the elements of the bridge topping and sidewalks, repair of minor damages of reinforced concrete structures, shore protection aimed at abutment reconstruction, installation of the safety parapet.

KEYWORDS: inspection of a bridge, bridge capacity analysis, reinforced concrete, bridge, on-site inspection, identification of bridge defects, elimination of defects, piers, bridge deck, bridge support structures

FOR CITATION: Piskun A.S., Ganets G.V., Averchenko G.A. Methods of on-site inspection of a reinforced concrete bridge exemplified by the bridge over the river Kosopasha. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(7):957-967. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.957-967 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В течение всего срока эксплуатации по разным причинам на мостовых сооружениях возникают всевозможные дефекты, которые в будущем, при несвоевременном их выявлении, ведут к разрушению. Во избежание разрушения в определенные сроки проводят обследование мостового сооружения.

Обследование выполняется для определения соответствия фактического состояния несущих конструкций мостовых сооружений требованиям норм, установления причин образования дефектов и оценки возможности эксплуатации сооружений под проектными нагрузками. Отчетной документацией является технический отчет по результатам обследования мостового сооружения, который служит основанием для разработки проектной документации по ремонту, капитальному ремонту или реконструкции сооружения. В рамках обследования осуществляется:

- визуальный осмотр конструкций сооружения;
- инструментальный осмотр сооружения;
- при необходимости проводится отбор кернов;
- отбор образцов металла для лабораторных исследований и пр.

На основании анализа результатов обследования разрабатываются рекомендации по ремонту и дальнейшей эксплуатации сооружения.

Визуальное обследование фактического технического состояния (натурный осмотр и обмеры) всех конструктивных элементов (сопряжений, стыковых соединений, узлов, швов) мостового полотна, пролетных строений, опор и опорных частей, подходов к мосту проводится с целью выявления имеющихся дефектов, повреждений и оценки степени их влияния на безопасность, долговечность, грузоподъемность и ремонтпригодность конструкции моста.

Большой вклад в развитие методов обследования мостов внесли следующие авторы: С.А. Бокарев, Л.Ю. Соловьев, Д.Н. Цветков, Е.В. Рогова, А.В. Бильченко, Е.В. Бережная, С.Н. Краснов, Д.Н. Смердов [1–3]. В их статьях были исследованы наиболее частые причины возникновения дефектов на мостах, основные факторы снижения грузоподъемности и приведены примеры получения этих данных. Так же инженерные сооружения на железных дорогах и магистралях, способы их обследования

изучены в трудах: С.М. Скоробогатова, М. Mahamid, D. Ozevin, I. Torra, M. Kabir, S. Mastny, S. Khudeira, B.W. Sauter, D. Zroka, B.R. Colford, S.R. Beabes, V.J. Bulmer, M. Hurt, S. Schock [4–7].

Каждое искусственное инженерное сооружение требует постоянного мониторинга, с течением времени появляются новые машины и технологии для этого. Например, современные методы, такие как термография и лазерное сканирование, рассмотрены в статьях О.И. Безбабичева, Н.В. Розенфельд, В.В. Кольвах, О.В. Павлова, Е.В. Токмакова, С.П. Глушкова, Л.Ю. Соловьева, Н.Е. Борисовской, L. Truong-Hong, D.F. Laefer [8–11]. Стоит упомянуть авторов: B. Kakillioglu, J. Wang, S. Velipasalar, A. Janani, E. Koch, N. Charron, E. McLaughlin, S. Phillips, K. Goorts, S. Phillips, S. Narasimhan [12–14] за их большой вклад в развитие технологий по обследованию сооружений с применением современных роботизированных машин.

Ключевым фактором при обследовании мостов является последовательный анализ конструктивных элементов моста с выявлением причин возникновения дефектов. Так, в статьях авторов: К.В. Покулаева, С.Э. Искендерова, А.Г. Щербакова, И.Г. Овчинникова, Г. Кларка, С.В. Чижова, Э.Т. Яхшиева [15–17] детально проанализированы причины возникновения дефектов в опорных частях и пролетных строениях. Более широкие и развернутые выводы о появлении дефектов на мостовых сооружениях на основании различных гипотез и последующих теоретических расчетов в цифровых моделях были сделаны в статьях: А. Pavlenko, А. Mishakova, B.T. Svendsen, G.T. Froseth, A. Ronnquist, L. Bondar, P. Koval, S. Stepanov [18–20].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве материалов и исходных данных проанализирован железобетонный мост через р. Косопаша в Волховском районе Ленинградской области, проведена фиксация дефектов.

Использован натурный метод как основной: сбор и анализ предварительной информации о сооружении, обмеры и визуальное освидетельствование конструкций, описаны основные дефекты, установлены причины возникновения, дан прогноз

развития и рекомендации по устранению имеющихся повреждений.

Акцент в статье сделан на визуальное освидетельствование и оценку повреждений: оголение арматуры и некачественную укладку бетонной смеси, выщелачивание бетона на балках пролетного строения, намокание балок пролетного строения, обрушение конструкций укрепления конусов и т.д.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Приведены результаты обследования конструкций моста через р. Косопаша на 5+910 км автодороги Паша – Свирица – Загубье.

Даны описание конструкции элементов моста, оценка их состояния на момент обследования, характеристика имеющихся дефектов и повреждений, оценка грузоподъемности пролетного строения.

На основании полученных результатов сформулированы рекомендации по режиму пропуска транспортных средств через мостовое сооружение и по ремонту или усилению несущих элементов.

Цели исследования:

- рассмотрение методов натурного обследования моста и их применение;
- определение технического состояния сооружения;
- разработка рекомендаций для дальнейшей эксплуатации.

1. Техническая характеристика моста

Особенности терминологии и счета элементов

Используемая терминология в отчете соответствует общепринятой и нормативной, согласно «Справочнику дорожной терминологии» под редакцией М.И. Вейцмана.

Для обозначения и счета элементов принята следующая нумерация:

- нумерация опор ведется по ходу километража, от опоры № 1 к опоре № 3;
- пролет обозначается по ходу километража, начиная с 1-го — 1, 2, 3...;
- нумерация главных балок пролетного строения осуществляется слева направо по ходу движения по мосту от опоры № 1 к опоре № 3;
- обозначение подходов и конусов: НМ — в начале моста, КМ — в конце моста;
- обозначение переходных плит — ПП, металлического барьерного ограждения — МБО.

Нумерация и терминология, отличная от вышеуказанной, оговаривается особо.

Особенности конструкции сооружения

Двухпролетный разрезной балочный мост расположен на 5+190 км автодороги Паша – Свирица – Загубье и предназначен для пересечения р. Косопаша близ населенного пункта Надкопанье (рис. 1).

Мост расположен на прямой в плане и на прямой в профиле. Полная длина моста по концам тротуарных блоков — 51,0 м, ширина моста — 10,74 м.



Рис. 1. Схема расположения моста

Fig. 1. Bridge location map

Ширина проезжей части составляет 8,0 м, ширина тротуаров — 1,5 м. Проектная временная нагрузка Н-30 и НК80. Подмостовой габарит — 4,12 м.

Пролетные строения состоят из пяти железобетонных тавровых балок длиной 21,0 м. Расчетные пролеты, соответственно 11,4 и 14,4 м. Опорные части — резинометаллические (РОЧ). Расстояние между балками — 2,1 м, высота балок — 1,2 м, толщина ребра — 0,16 м. Поперечная схема пролетных строений К1,05 + 2,10 × 4 + К1,05.

Деформационные швы на мосту — закрытого типа.

Проезжая часть моста имеет неравномерный уклон, при этом предполагался сбор воды на проезжей части от оси проезда к консолям и сброс под мост. Покрытие асфальтобетонное толщиной ~12 см.

Тротуары на мосту шириной 1,5 м — повышенного типа, устроены на тротуарных блоках.

Перильные ограждения на мосту — металлические, сварные, непрерывные высотой 1,13 м.

Устои моста — заливные, на свайном основании (по типовому проекту № 729 Ленгипротрансмост 1970 г.). Сваи железобетонные 0,40 × 0,40 м в количестве 21 шт. Высота ригелей — 2,8 м, ширина — 10,0 м, длина — 3,5 м.

Промежуточная опора — железобетонная стойка с ригелем на свайном ростверке (по индивидуальному проекту в соответствии с исполнительной документацией). Ригель высотой 1,0 м, шириной 1,7 м и длиной 10,0 м. Длина массивной части опоры — 7 м.

На проезжей части моста присутствует дорожная разметка. Дорожные знаки не установлены. Также на мосту отсутствуют освещение и судовая сигнализация. Сброс воды осуществляется поперек мостового сооружения через тротуары.

2. Обследование моста

Общие сведения

Обследование включало осмотр проезжей части, видимых частей конструкций пролетного строения, устоев моста с фотофиксацией обнаруженных дефектов и повреждений.

Осмотр элементов конструкций пролетного строения моста и опор осуществлялся как с земли, так и с воды.

Были произведены первичный и вторичный осмотры моста с промежутком в год.

Мостовое полотно

Покрытие ездового полотна

Согласно выполненным обмерным работам минимальная ширина проезжей части между внутренними гранями ограждения моста составила Г-7.91, тротуары шириной по 1,70 м. Габариты исследуемого автодорожного моста близки к нормам для дороги IV технической категории общего пользования (требуемый габарит не менее Г-8).



Рис. 2. Общий вид покрытия моста

Fig. 2. Overall appearance of the bridge topping

Покрытие проезжей части на мосту — асфальтобетон. Покрытие моста находится в удовлетворительном состоянии (рис. 2), не имеет значительных ям и трещин. Покрытие подходов из асфальтобетона — также в удовлетворительном состоянии (рис. 3). Выявлены углы перелома продольного профиля в сечении: над опорами № 1, 2 и 3. Переломы покрытия не влияют на движение.

Обнаруженные дефекты классифицируются как неопасные (Б1) из-за нарушения безопасности проезда, ремонтпригодность Р2.



Рис. 3. Общий вид подхода к мосту

Fig. 3. Overall appearance of the bridge approach

Деформационные швы

На мосту — деформационные швы закрытого типа. В связи с наличием трещин на асфальтобетонном покрытии состояние деформационных швов можно признать неудовлетворительным (рис. 4). На данный момент герметичность не нарушена.



Рис. 4. Трещина над деформационным швом
Fig. 4. Crack above the expansion joint

Ограждения безопасности

Ограждение безопасности на мосту отсутствует (рис. 5). Защита тротуаров предусмотрена только за счет устройства повышенных тротуаров. Данное условие по безопасности не отвечает современным требованиям ГОСТ Р 52289-2004.

Ограждение проезжей части на подходах КМ и НМ — металлическое барьерного типа, высотой 0,73 м, на стойках из двутавра № 12 с жесткими консолями. Участки слева и справа — по 12 м.

Тротуары и перильные ограждения

Ширина тротуаров — 1,70 м, покрытие — асфальтобетонное. При расположении объекта в населенном пункте тротуары должны быть шириной 1 м. Перильное ограждение достаточной высоты — 113 см (требуется 110 см). Тротуарные блоки имеют большие сколы бетона, оголение арматуры. Состояние блоков — неудовлетворительное (рис. 5). Отсутствует стойка перильного ограждения, отмечаются деформированные стойки, вследствие чего произошел разрыв в верхнем поясе ригеля ограждения. Требуется текущий ремонт.

Гидроизоляция

Состояние гидроизоляции оценивалось по результатам осмотра плиты проезжей части снизу. При осмотре пролетных строений отмечено незначительное нарушение гидроизоляции, выразившееся в протечках и выщелачивании бетона (рис. 6). Обнаруженные дефекты расположены на небольшой



Рис. 5. Деформация перильного ограждения
Fig. 5. Deformation of safety rails



Рис. 6. Протечки на консоли в пролете № 1
Fig. 6. Leaks in the cantilever of span 1

площади мостового полотна и классифицируются как незначительные. Устранение дефектов сопряжено с трудностями по разборке слоев мостового полотна, тротуаров, ремонтпригодность Р2. Состояние гидроизоляции оценивается как удовлетворительное.

Водоотвод

Водоотвод на мосту с проезжей части предусмотрен через водоотводные трубки под мост за счет поперечных и продольных уклонов (рис. 7). При рассмотрении имеющейся схемы отвода в целом можно отметить протечки, наличие переломов продольного профиля на мосту, несоответствие параметров уклонов поперечного и продольного профилей. На мосту отсутствуют зоны с застоями воды на покрытии. Продольные профили подходов исключают влияние сбора воды с подходов на мост, они располагаются в более низких отметках относительно моста.

По требованиям нормативов (СП 35.13330.2011 пп. 5.77), отвод воды при длине сооружения менее



Рис. 7. Водосброс в начале моста

Fig. 7. Water outlet in the approach slab

50 м допускается несколькими вариантами, наиболее предпочтителен за счет уклонов вдоль моста на подходы с перехватом воды перед мостом и после него.

Обнаруженные дефекты классифицируются как незначительные и не влияют на состояние нижележащих конструкций. Состояние существующей системы водоотвода в целом оценивается, как удовлетворительное.

Сопряжение с насыпью. Подходы

Сопряжение моста с подходами выполнено переходными плитами. В местах сопряжения в начале и конце моста не выявлены значительные переломы покрытия и застои воды из-за провалов плит или

опор. Покрытие подходов — асфальтобетонное. Общее состояние сопряжений — удовлетворительное.

Пролетное строение

При первом обследовании на балках пролетных строений были выявлены выщелачивание бетона и оголения арматуры в монолитных частях (рис. 8). Протечки и выщелачивание бетона обнаружены на швах омоноличивания по плите проезжей части снизу. Все балки пролетов имели провисание в пределах до 4 см, что не превышает расчетные параметры для балок данных пролетов.

На момент вторичного обследования через год все вышеперечисленные дефекты остались визуально не изменившимися, кроме консольной части балок пролетного строения. В пролете 1 на консольной части крайних балок выявлена наполовину вырванная арматура (рис. 9).

Наличие дефектов существенно не отразилось на работе пролетного строения. Недостаточные защитные слои бетона под воздействием протечек ведут к увеличивающейся площади оголения арматуры, возникновению процесса коррозии. Прочностные показатели бетона монолитной плиты пролетных строений не ниже нормативных значений. В целом, состояние пролетных строений оценивается как удовлетворительное.

Опорные части

Опорные части — резиновые (рис. 10). Состояние опорных частей — удовлетворительное.

Опоры

Обследование опор моста не показало дефектов и повреждений силового характера. Ригели и насадки не имеют наклонных поверхностей (сточных треугольников). Наблюдаются оголения арматуры на консолях, участки биопоражения (рис. 11).



Рис. 8. Выщелачивание бетона на балках пролетного строения, намокание балок пролетного строения

Fig. 8. Leaching of the span beam concrete, span beam soakage



Рис. 9. Отрыв арматуры от балок пролетного строения

Fig. 9. Reinforcement separation from span beams



Рис. 10. Опорные части

Fig. 10. Bridge support structures



Рис. 11. Биопоражения
Fig. 11. Biological damage



Рис. 12. Обрушение конструкций укрепления конусов
Fig. 12. Failure of bridge abutment structures

Дефекты отнесены к первой категории по долговечности (Д1). Техническое состояние опор — работоспособное.

Конусы. Регуляционные сооружения

Предусмотрено устройство бетонного укрепления конусов. На момент первичного обследования частично было обрушено берегоукрепление, отмечались провалы в укреплении конусов. В течение года произведен ремонт конусов, что видно на фотографии после вторичного осмотра (рис. 12), но не была снята опалубка, что может вскоре привести к трещинообразованию на конусе вследствие разрушения деревянной опалубки.

Подмостовая зона

Под мостом протекает р. Косопаха. В подмостовой территории на момент обоих обследований не выявлены загрязнения и растительность. Состояние оценивается как удовлетворительное.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основываясь на натурных обследованиях конструкций моста через р. Косопаху на 5+910 км автодороги Паша – Свирица – Загубье в Волховском районе Ленинградской области, сделаны следующие выводы.

К конструктивным недостаткам обследуемого мостового перехода следует отнести:

- трещины в асфальтовом покрытии над деформационными швами;
- отсутствие ограждения безопасности;
- оголение арматуры в монолитных частях пролетного строения.

Техническое состояние моста по ОДМ 218.4.001-2011 оценивается как неудовлетворительное (2 балла).

Опасные дефекты, которые в значительной степени снижают основные транспортно-эксплуатационные показатели мостового сооружения:

- по долговечности Д1 (оголение арматуры, трещины над деформационными швами);
- по безопасности Б2 (отсутствие ограждения безопасности).

В соответствии с классификацией работ по содержанию искусственных сооружений на автомобильных дорогах общего пользования требуется выполнить комплекс мероприятий:

- по очистке от пыли и грязи элементов мостового полотна и тротуаров;
- по очистке от растительности и мелкокося конусов в границах полосы отвода автомобильной дороги;
- устранить мелкие повреждения железобетонных конструкций (заделать трещины, сколы, раковины, восстановить защитный слой с помощью быстротвердеющих ремонтных смесей);

- провести берегоукрепительные работы (восстановление конусов и их укрепление);
- установить ограждения безопасности на мосту.

Для восстановления существующих технико-экономических показателей сооружения необходимо рекомендовать выполнение комплекса работ по ремонту отдельных узлов и конструкций. Планируемые строительно-монтажные работы на стадии «Ремонт»:

- установка ограждения безопасности на мосту;

- устройство козырьков вдоль пролетов и сливов с горизонтальных поверхностей опор и пролетных строений;
- устройство конусов и укрепление, берегоукрепительные работы;
- ремонт деформационных швов.

Основные изменения, произошедшие в течение года, — отрыв арматуры от балок пролетного строения, вследствие активного выщелачивания бетона и коррозии арматуры, и некачественный ремонт конусов пролетного строения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бокарев С.А., Соловьев Л.Ю., Цветков Д.Н., Рогова Е.В. Результаты полномасштабного обследования и испытания сталежелезобетонных пролетных строений железнодорожных мостов Сибири и Дальнего Востока // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2009. С. 160–170.
2. Бильченко А.В., Бережная Е.В., Краснов С.Н. Эксплуатационное состояние мостов Харьковской области на основе данных обследований // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2006. С. 63–65.
3. Смердов Д.Н. Натурные исследования железобетонного пролетного строения автодорожного моста, усиленного композитными материалами // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог : сб. науч. тр. ОАО «Гипродорнии». 2012. № 3. С. 27–33.
4. Скоробогатов С.М. Ускоренное обследование массивных и протяженных железнодорожных сооружений и конструкций // Транспорт Урала. 2004. № 1. С. 60–69.
5. Mahamid M., Ozevin D., Torra-Bilal I., Kabir M., Mastny S., Khudeira S. et al. Structural Design and Inspectability of Highway Bridges // Practice Periodical on Structural Design and Construction. 2019. Vol. 24. Issue 3. P. 06019002. DOI: 10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000425
6. Colford B.R., Beabes S.R., Bulmer V.J. Bridge Design for Inspection and Maintenance — a UK and US perspective // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Bridge Engineering. 2019. Vol. 172. Issue 4. Pp. 246–256. DOI: 10.1680/jbren.18.00061
7. Hurt M., Schrock S. Bridge Inspection and Evaluation // Highway Bridge Maintenance Planning and Scheduling. 2016. Pp. 99–154. DOI: 10.1016/b978-0-12-802069-2.00003-9
8. Безбабичева О.И., Розенфельд Н.В., Кольвах В.В. Разработка специальной техники для обследования и ремонта автодорожных мостов // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2006. № 34–35. С. 60–62.
9. Павлов О.В., Токмаков Е.В. Применение наземного лазерного сканирования при обследовании мостов // Современные техника и технологии : XX Междунар. юбилейная науч.-практ. конф. студ. асп. и мол. уч. Томск, 2014. С. 97–98.
10. Глушков С.П., Соловьев Л.Ю., Борисовская Н.Е. Выявление дефектов в усиленных композиционными материалами конструкциях методом инфракрасной термографии // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2015. № 4 (35). С. 36–42.
11. Truong-Hong L., Laefer D.F. Laser scanning for bridge inspection // Laser Scanning. 2019. Pp. 189–214. DOI: 10.1201/9781351018869-12
12. Kakillioglu B., Wang J., Velipasalar S., Janani A., Koch E. 3D Sensor-Based UAV Localization for Bridge Inspection // 2019 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. 2019. DOI: 10.1109/IEEECONF44664.2019.9048979
13. Charron N., McLaughlin E., Phillips S., Goorts K. Automated Bridge Inspection Using Mobile Ground Robotics // Journal of Structural Engineering. 2019. Vol. 145. Issue 11. P. 04019137. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002404
14. Phillips S., Narasimhan S. Automating Data Collection for Robotic Bridge Inspections // Journal of Bridge Engineering. 2019. Vol. 24. Issue 8. P. 04019075. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0001442
15. Покулаев К.В., Искендеров С.Э., Щербаков А.Г., Овчинников И.Г. Анализ причин появления дефектов в опорных частях железнодорожного моста в процессе его обследования // Интернет-журнал «Науковедение». 2013. № 3 (16). С. 175. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/107tvn313.pdf>
16. Кларк Г. Последние результаты и выводы, полученные при обследовании железобетонных мостов с натяжением арматуры на бетон // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2013. № 4–5 (31). С. 62–71.
17. Чижов С.В., Яхишев Э.Т. Анализ системных факторов безотказной работы железобетонных

пролетных строений по данным натурных обследований // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8. № 4 (35). С. 63. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/70TVN416.pdf>

18. Pavlenko A., Mishakova A. Feasibility of using of accelerated test methods for determination of frost-resistance for concrete // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 157. P. 8. DOI: 10.1051/e3sconf/202015706035

19. Svendsen B.T., Froseth G.T., Ronnquist A. Damage Detection Applied to a Full-Scale Steel Bridge Using Temporal Moments // Shock and Vibration. 2020. Pp. 1–16. DOI: 10.1155/2020/3083752

20. Bondar L., Koval P., Stepanov S. Inspection of bridges and improvement of the criteria of bridges inspections schedule // Roads and Bridges. 2017. Pp. 42–53.

Поступила в редакцию 24 апреля 2020 г.

Принята в доработанном виде 20 мая 2020 г.

Одобрена для публикации 26 июня 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Артем Сергеевич Пискун** — BIM-координатор; **Фарм Дизайн**; 197350, г. Санкт-Петербург, Дорога в Каменку, д. 74, Лит. А; SPIN-код: 6585-1074, ORCID: 0000-0003-1639-9821; piskun.as@edu.spbstu.ru;

Галина Вадимовна Ганец — техник; **Альянс-Авто Трак**; 196143, г. Санкт-Петербург, ул. Ленсовета, д. 34, корп. 3; SPIN-код: 9276-3839, ORCID: 0000-0002-0980-7930; ganets.galina@yandex.ru;

Глеб Александрович Аверченко — ассистент; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 891860, ORCID: 57216628688, ResearcherID: AAI-2145-2020, ORCID: 0000-0001-8813-545X; Rusbim.com@ya.ru.

REFERENCES

1. Bokarev S.A., Soloviev L.Yu., Tsvetkov D.N., Rogova E.V. The results of a full-scale examination and testing of steel-reinforced concrete spans of railway bridges in Siberia and the Far East. *Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2009; 160-170. (rus.).

2. Bilchenko A.V., Berezhnaya E.V., Krasnov S.N. The operational condition of the bridges of the Kharkov region based on survey data. *Bulletin of the Kharkov National Automobile and Highway University*. 2006; 63-65. (rus.).

3. Smerdov D.N. Field investigations of concrete spans of highway bridges reinforced by composite materials. *Actual problems of road design. Collection of scientific papers of JSC Giprodorniya*. 2012; 3:27-33. (rus.).

4. Skorobogatov S.M. Accelerated inspection of massive and long railway structures and structures. *Transport of the Urals*. 2004; 1:60-69. (rus.).

5. Mahamid M., Ozevin D., Torra-Bilal I., Kabir M., Mastny S., Khudeira S. et al. Structural Design and Inspectability of Highway Bridges. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2019; 24(3):06019002. DOI: 10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000425

6. Colford B.R., Beabes S.R., Bulmer V.J. Bridge Design for Inspection and Maintenance — a UK and US perspective. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Bridge Engineering*. 2019; 172(4):246-256. DOI: 10.1680/jbren.18.00061

7. Hurt M., Schrock S. Bridge Inspection and Evaluation. *Highway Bridge Maintenance Planning*

and Scheduling. 2016; 99-154. DOI: 10.1016/b978-0-12-802069-2.00003-9

8. Bezbabicheva O., Rozenfeld N., Kolvah V. The development of special equipment for survey and repair of highway bridges. *Bulletin of the Kharkov National Automobile and Highway University*. 2006; 60-62. (rus.).

9. Pavlov O.V., Tokmakov E.V. The use of ground-based laser scanning when examining bridges. *Modern Techniques and Technologies: XX International Anniversary Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*. Tomsk, 2014; 97-98. (rus.).

10. Glushkov S.P., Soloviev L.Yu., Borisovskaya N.E. Identification of defects in structures reinforced with composite materials by infrared thermography. *Bulletin of the Siberian State University of Railway Engineering*. 2015; 4(35):36-42. (rus.).

11. Truong-Hong L., Laefer D.F. Laser scanning for bridge inspection. *Laser Scanning*. 2019; 189-214. DOI: 10.1201/9781351018869-12

12. Kakillioglu B., Wang J., Velipasalar S., Janani A., Koch E. 3D Sensor-Based UAV Localization for Bridge Inspection. *2019 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*. 2019. DOI: 10.1109/IEEECONF44664.2019.9048979

13. Charron N., McLaughlin E., Phillips S., Goorts K. Automated Bridge Inspection Using Mobile Ground Robotics. *Journal of Structural Engineering*. 2019; 145(11):04019137. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002404

14. Phillips S., Narasimhan S. Automating Data Collection for Robotic Bridge Inspections. *Jour-*

nal of Bridge Engineering. 2019; 24(8):04019075. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0001442

15. Pokulaev K.V., Iskenderov S.E., Scherbakov A.G., Ovchinnikov I.G. Analysis of the causes of defects in bearing of the railway bridge in the course of its examination. *Internet Journal of Science of Science*. 2013; 3(16):175. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/107tvn313.pdf> (rus.).

16. Clark G. Recent findings from inspection of post-tensioned concrete bridges and lessons learnt. *ALITinform: Cement. Concrete. Dry mixes*. 2013; 4-5(31):62-71. (rus.).

17. Chizhov S.V., Yakhshiev E.T. Review system uptime factors concrete superstructures according

to field surveys. *Internet Journal of Science of Science*. 2016; 8(4):(35):63. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/70TVN416.pdf> (rus.).

18. Pavlenko A., Mishakova A. Feasibility of using of accelerated test methods for determination of frost-resistance for concrete. *E3S Web of Conferences*. 2020; 157(8):8. DOI: 10.1051/e3sconf/202015706035

19. Svendsen B.T., Froseth G.T., Ronnquist A. Damage Detection Applied to a Full-Scale Steel Bridge Using Temporal Moments. *Shock and Vibration*. 2020; 1-16. DOI: 10.1155/2020/3083752

20. Bondar L., Koval P., Stepanov S. Inspection of bridges and improvement of the criteria of bridges inspections schedule. *Roads and Bridges*. 2017; 42-53.

Received April 24, 2020

Adopted in a revised form on May 20, 2020.

Approved for publication June 26, 2020

BIONOTES: **Artem S. Piskun** — BIM coordinator; **Farm Design**; Lit. A, 74 The road to Kamenka, St. Petersburg, 197350, Russian Federation; SPIN-code: 6585-1074, ORCID: 0000-0003-1639-9821; piskun.as@edu.spbstu.ru;

Galina V. Ganets — technician; **Alliance-Auto Truck**; build. 3, 34 Lensovet st., St. Petersburg, 196143, Russian Federation; SPIN-code: 9276-3839, ORCID: 0000-0002-0980-7930; ganets.galina@yandex.ru;

Gleb A. Averchenko — assistant; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; IDRISC: 891860, ORCID: 57216628688, ResearcherID: AAI-2145-2020, ORCID: 0000-0001-8813-545X; Rusbim.com@ya.ru.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 620.17:691

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.968-979

Механическая прочность золошлакового щебня угольных тепловых электростанций

А.А. Лунев

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ); г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Использование отходов производства в строительной отрасли является общемировой практикой, которая позволяет в значительной степени обеспечить потребность отрасли в строительных материалах. Крупнозернистые шлаковые отложения (золошлаковый щебень и песок), формирующиеся в зоне шлакового размыва, имеют больший потенциал применения, чем прочие золошлаковые смеси (ЗШС), однако они менее изучены. Рассматривается вопрос применения золошлакового щебня (крупнозернистых ЗШС), образованного при сжигании углей Канско-Ачинского, Кузнецкого угольных месторождений (в котлах с жидким и сухим шлакоудалением), для сооружения автомобильных дорог с позиции ее механических свойств.

Материалы и методы. Определены дробимость и модуль деформации отдельных фракций образцов золошлакового щебня (в сухом и насыщенном водой состоянии), отобранных с отвалов Новосибирской ТЭЦ-3 (сжигающей угли Канско-Ачинского угольного бассейна), а также Новосибирской ТЭЦ-2 и Северской ТЭЦ (сжигающих угли Кузнецкого угольного бассейна). Для оценки факторов, влияющих на механическую прочность золошлакового щебня, дополнительно устанавливались потери при прокаливании, содержание лещадных и игольчатых частиц, пылевато-глинистых частиц и глины в комках.

Результаты. Выявлено различие в механической прочности проб материала разного генезиса. Оценены полученные при проведении испытаний графики, на основе которых вычислены характеристики деформируемости материала (при разной крупности). Обусловлены факторы, влияющие на механическую прочность золошлакового щебня. Получены зависимости, связывающие деформационные параметры золошлакового щебня и результаты определения их дробимости.

Выводы. Установлены некоторые механические и физические параметры золошлакового щебня, исходя из которых выяснены направления возможного применения при строительстве автомобильных дорог. Найдена математическая зависимость для прогнозирования модуля деформации золошлакового щебня, необходимая для проектирования сооружений из данного материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, автомобильные дороги, дорожная одежда, золошлаковые смеси, золошлаковый щебень, дробимость, модуль деформации

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лунев А.А. Механическая прочность золошлакового щебня угольных тепловых электростанций // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 7. С. 968–979. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.968-979

Mechanical strength of slag crushed stone generated at coal-fired thermal power plants

Aleksandr A. Lunev

The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI); Omsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Production waste is used in the construction industry worldwide as it helps to cover a considerable portion of the industry's demand for building materials. Coarse-grained slag deposits (slag crushed stone and sand), formed in the slag washout zone, have more potential for application than other ash and slag mixtures (coarse ASM), but they need more research. Mechanical properties of the slag crushed stone (coarse-grained ASM), formed in the course of coal combustion at Kansk-Achinsk, Kuznetsk coal deposits (in boilers equipped with liquid and dry slag removal facilities) and the application of the slag crushed stone in roadbuilding are considered.

Materials and methods. In the course of the research, the crushability and the deformation modulus of particular fractions of slag crushed stone samples (in dry and water-saturated conditions) taken from the dumps of Novosibirsk TPP-3 (that consumes the coal of the Kansk-Achinsk coal mining field) and from Novosibirsk TPP-2 and Seversk TPP (that consume the coal of the Kuznetsk coal mining field) were identified. To assess the factors influencing the mechanical strength of the slag crushed stone, ignition losses, the content of flaky and acicular particles, dust and clay particles and clay lumps was made.

Results. The difference in the mechanical strength of samples having different genesis was identified. The graphs obtained in the course of testing were assessed and deformability characteristics were calculated (for materials having different fineness values). The factors influencing the mechanical strength of slag crushed stone were determined. Dependencies between deformation parameters and crushability of the slag crushed stone were obtained.

Conclusions. Some mechanical and physical parameters of the slag crushed stone were identified; they were applied to outline potential areas of the slag crushed stone application in road building. The mathematical relationship needed to project the deformation modulus of the slag crushed stone was identified. This relationship will be used to design structures to be made of this material.

KEYWORDS: construction, motor roads, road pavement, ash and slag mixtures, slag crushed stone, crushability, deformation modulus

FOR CITATION: Lunev A.A. Mechanical strength of slag crushed stone generated at coal-fired thermal power. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(7):968-979. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.968-979 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Один из основных источников производства тепловой и электрической энергии во всем мире — ископаемый уголь [1]. Значительная часть экспертов энергетической отрасли придерживается мнения, что альтернативные источники энергии являются будущим энергетики, однако, по прогнозам специалистов, в ближайшие десятилетия нет предпосылок для глобального изменения подходов к производству энергии, а значит, уголь останется основным энергетическим ресурсом.

Сжигание угля в котлах тепловых электростанций сопряжено с образованием от 10 до 50 % отходов теплогенерации (побочных продуктов) — золошлаков (золы уноса, золошлаковой смеси — ЗШС, микросферы). В Российской Федерации ежегодно образуется свыше 24 млн золошлаковых отходов (ЗШО), что составляет 40 % всех производственных отходов [2]. По оценкам специалистов, в РФ утилизируется только 8–10 % образованных за год золошлаков (в некоторых странах до 100 %), большая часть размещается на специализированных гидротехнических сооружениях — золоотвалах.

Технология складирования ЗШО на золоотвалах имеет ряд серьезных недостатков:

- в летний период поверхность золоотвала может пылить и загрязнять окружающую территорию;
- размещение золоотвалов требует исключения пригодных земель из хозяйственного оборота;
- хранение ЗШО в отвалах сопряжено с риском обрушения дамб, которые приводят к катастрофическим нарушениям экосистем в случае аварий [3–5] (несмотря на тот факт, что проведенные исследования доказывают безопасность этого класса материалов) [6, 7].

Кроме того, ЗШС — материал с особыми свойствами, использование которого возможно во многих направлениях хозяйства: мелиорация сельхозугодий [8], извлечение соединений алюминия [9], получение редкоземельных элементов [10], изготовление композиционных материалов [11–13], производство бетонов [14, 15], сооружение конструкций автомобильных дорог [16, 17] и возведение грунтовых сооружений [18, 19].

Лидерами по количеству использованных золошлаковых материалов (ЗШМ) являются Индия [20] и Китай [21]. Китай рассматривает ЗШМ в основном как промышленное сырье при производстве алюминия [9, 22], мелиорации почв и в качестве заполнителей для строительных смесей [23, 24]. В Индии строятся уникальные строительные объекты, применяются миллионы тонн этих материалов каждый год [25]. Ученые Индии занимаются главным образом исследованиями по определению параметров механических свойств ЗШС и получению нестандартных конструкций и новых грунтовых комбинаций на основе ЗШС [20, 26, 27]. Но, несмотря на большое число выполненных исследований, до сих пор не были проанализированы механические свойства крупных шлаковых частиц.

Шлаковые частицы крупного размера (золошлаковый щебень) образуются преимущественно при сжигании углей с низкой температурой плавления в нижней части топочного пространства, поэтому их количество в общей массе ЗШС невысоко. Однако эти материалы обладают высокой фильтрующей способностью, почти полным отсутствием морозного пучения, а также более стабильными механическими характеристиками при увлажнении (за счет отсутствия растворимых веществ и низкой влагоемкости).

Технология транспортировки золошлаковой пульпы на золоотвал вызывает сегрегацию золошлаков (более плотные и крупные частицы осаждаются в зоне сброса пульпы, в то время как мелкие и легкие уносятся русловыми потоками к шандорным колодцам [28]). Поэтому на отвалах электростанций, на которых имеется зона шлакового размыва, она представлена преимущественно шлаковым щебнем и песком (в исследованных образцах наблюдалось до 95 % шлакового щебня и песка по массе). Это указывает на возможность использования данного материала без специальной сепарации.

В то же время передача нагрузок в крупнозернистых ЗШС имеет существенные отличия от мелкозернистых смесей, которые изучены гораздо подробнее. Исследования, проведенные R.P. Behringer [29], T. Takahashi [30], A.H. Clark [31], показывают,

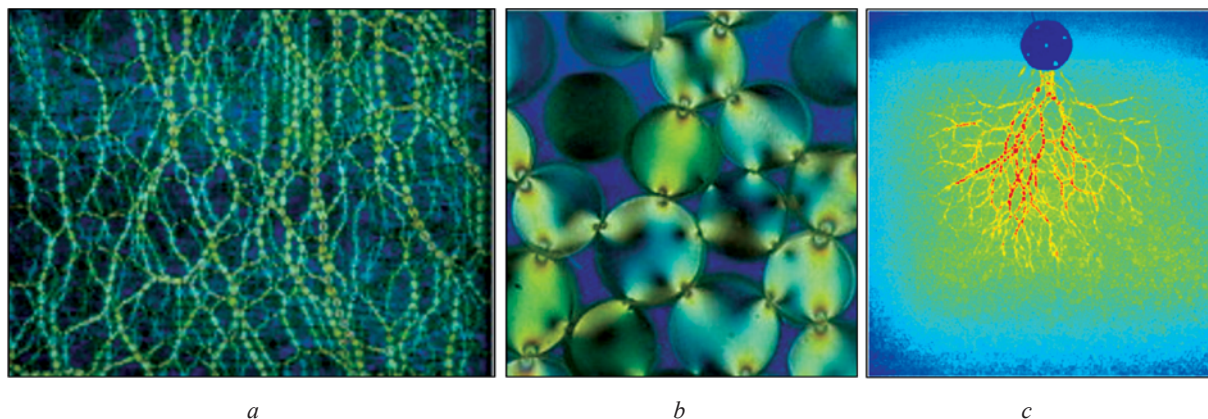


Рис. 1. Цепочки напряжений, образующиеся в фотоупругих элементах при нагружении, видимые в поляризованном свете: *a* — цепочки в массиве фотоупругих элементов [29]; *b* — визуализация контактных напряжений [29]; *c* — распределение напряжений в массиве элементов под действием колесной нагрузки [30]

Fig. 1. Stress circuits arising in photo-elastic elements exposed to loading and visible in the polarized light: *a* — circuits in an array of photo-elastic elements [29]; *b* — visualization of contact stresses [29]; *c* — stress distribution in an array of elements exposed to the wheel load [30]

что распределение напряжений в зернистых материалах кардинальным образом зависит от крупности частиц и их компоновки. Крупнозернистые смеси имеют малое число точек контактов, при этом часть зерен воспринимает наибольшую нагрузку, а некоторые вообще не испытывают напряжений (рис. 1). Поэтому разрушение нагруженной частицы, спровоцированное повышением напряжений в ходе контакта, будет вызывать перераспределение агрегатов, сопряженное с осадкой конструкции.

По этой причине важно не только изучение деформационных свойств золошлакового щебня, но и оценка его сопротивляемости к разрушению под действием механических нагрузок, поскольку именно прочность отдельных агрегатов будет влиять на работоспособность конструктивного элемента из этого материала.

Цель исследования — оценка механической прочности золошлакового щебня и определение факторов, влияющих на нее.

Для достижения цели поставлено несколько задач:

- определить дробимость фракционированного золошлакового щебня от сжигания канско-ачинских и кузнецких углей;
- определить деформационные характеристики золошлакового щебня;
- провести испытания по выявлению потерь при прокаливании, по содержанию лежачих частиц, глины в комках и содержанию пылеватых частиц, которые могут оказать влияние на свойства щебня;
- проанализировать полученные результаты и установить факторы, влияющие на механическую прочность щебня.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наиболее распространенными ЗШС в РФ являются золошлаки от сжигания экибастузских, кузнецких и канско-ачинских углей. Образование крупнозернистого шлака в большей степени характерно для ТЭЦ, работающих на кузнецких и канско-ачинских углях. Поэтому для исследования отбирались образцы материала из зоны шлакового размыва отвалов трех электростанций (до 65 % материала в образцах — золошлаковый щебень, а до 50 % относятся к шлаковым пескам):

- Новосибирской ТЭЦ-2 (станция работает на кузнецких углях, в котлах образуется плотный шлак);
- Новосибирской ТЭЦ-3 (станция работает на канско-ачинских углях, в котлах образуется плотный шлак);
- Северской ТЭЦ (станция работает на кузнецких углях, в котлах образуется пористый шлак).

В опытах изучались три вида золошлакового щебня: плотный шлак Новосибирской ТЭЦ-2, плотный шлак Новосибирской ТЭЦ-3 и пористый шлак Северской ТЭЦ. Внешний вид исследуемых материалов представлен на рис. 2.

Поскольку в работах В. Indraratna, Р. Nutalaya [32] и К. S. Koo, А. Marto, А. R. Awang, А. М. Makhtar [33] имеются ссылки на связь химического состава (генезис) и механических свойств мелкозернистых ЗШС, целесообразно оценить степень влияния химического состава на свойства крупных частиц. Для этого в работе приведен химический состав ЗШС (табл. 1).

Дробимость отобранного золошлакового щебня определялась по методике ГОСТ 8269.0-97 путем испытания проб ЗШМ, подготовленных в лаборатории. Пробы рядового золошлакового щебня

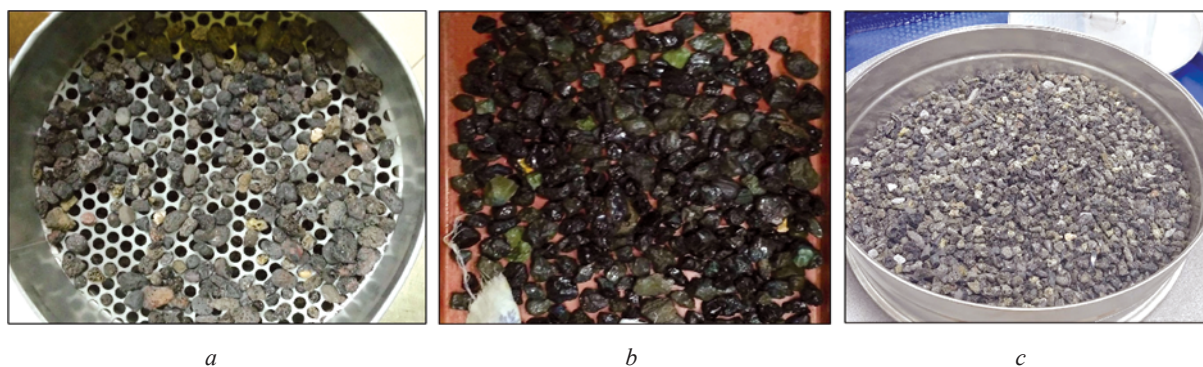


Рис. 2. Образцы исследуемого материала: *a* — щебень Новосибирской ТЭЦ-2; *b* — щебень Новосибирской ТЭЦ-3; *c* — щебень Северской ТЭЦ

Fig. 2. Samples of the material exposed to the research: *a* — crushed stone generated at Novosibirsk TPP-2; *b* — crushed stone generated at Novosibirsk TPP-3; *c* — crushed stone generated at Seversk TPP

Табл. 1. Химический состав исследованных материалов (ЗШС)

Table 1. The chemical composition of the materials exposed to the research (ASM)

Вид сжигаемого угля / Type of burnt coal	Химический состав по оксидам, % по массе (с учетом п.п.п.) / Chemical composition by oxides, % by weight (including LOI)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	п.п.п. / LOI
Каменный уголь Кузнецкого угольного бассейна / Bituminous coal of the Kuznetsk coal mining field	50–64	18–30	4–15	2–10	0,5–2,5	1,3–2,4	0,5–1,3	0,3–2,2	3–22
Бурый уголь Канско-Ачинского угольного бассейна (Бород) / Brown coal of the Kansk-Achinsk coal mining field (Borod)	40–55	4–10	6–14	20–35	3–6	0,3–1,5	0,2–0,5	0,9–5	2

Примечание: п.п.п. — потеря массы при прокаливании (содержание горючих веществ) /

Note: LOI — loss on ignition (content of combustibles)

высушивали от постоянной влажности и разделяли на стандартные фракции щебня (размером 5–10; 10–20; 20–40 мм) посредством просеивания материала на соответствующих ситах. Часть материала пробы выдерживали в воде в течение 2 ч для дальнейшего испытания в насыщенном состоянии.

В связи с ограниченным количеством материала для исследований, определение дробимости проводилось для фракций 5–10 и 10–20 в цилиндре диаметром 75 мм, а для фракции 20–40 в цилиндре диаметром 150 мм. Испытания в цилиндре диаметром 75 мм осуществлялись в автоматизированном прессе ИР 5081-5 (рис. 3), а в цилиндре диаметром 150 мм — в гидравлическом прессе. При проведении испытаний велись видео- и аудиозаписи, необходимые для дифференциации стадии эксперимента в зависимости от интенсивности дробления частиц.

Каждую фракцию проб шлакового щебня испытывали не менее трех раз в высушенном состоя-

нии и не менее трех раз в насыщенном водой состоянии. В ходе исследования (просева на контрольном сите после сжатия в цилиндре) устанавливалась величина дробимости каждой отдельной фракции.

Во время опытов записывался звуковой файл процесса разрушения. В дальнейшем это позволило дифференцировать испытания на три стадии поведения сжимаемого материала: упругая стадия (дробление практически отсутствует); интенсивное дробление (начало дробления частиц, каждую секунду разрушается 3 и более частиц) и затухание дробления (снижение частоты дробления частиц ниже 1 Гц, несмотря на ускоренный рост напряжений).

Поскольку оборудование для исследования на дробимость может рассматриваться как аналог компрессионного прибора, то по графикам (деформации от нагрузки), полученным в ходе эксперимента, были определены деформационные характеристики ЗШС (модули деформации).



Рис. 3. Процесс проведения испытаний: *a* — испытательный пресс ИР 5081-5 с компьютерным управлением; *b* — образец в цилиндре диаметром 75 мм

Fig. 3. Testing process: *a* — computer-controlled testing press IR 5081-5; *b* — a sample in the cylinder having the diameter of 75 mm

Модуль деформации определялся как отношение изменения нагрузки в пределах упругой стадии деформирования образца (до разрушения агрегатов) к изменению относительной деформации образца за тот же период. Толщина образца золошлакового щебня в форме для выявления дробимости вычислялась на основе координат позиционирования нагружающего устройства до начала испытаний.

Дополнительно выполнялись следующие испытания фракционированного золошлакового щебня от сжигания канско-ачинских и кузнецких углей: определение содержания глины в комках по методике ГОСТ 33026-2014; выявление потерь при прокаливании по методике ГОСТ 9758-2012; установление содержания пылевидных и глини-

стых частиц в щебне отмучиванием в соответствии с ГОСТ 32859-2014; определение содержания частиц лещадной формы по ГОСТ 32826-2014.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследований проанализированы пробы каждой фракции материала в сухом и насыщенном водой состояниях для каждого типа материала. Результаты исследований приведены на графике (рис. 4).

На основе полученных результатов (рис. 4) была приближенно присвоена марка по прочности исследованных образцов золошлакового щебня. В связи с отсутствием в нормативной базе РФ

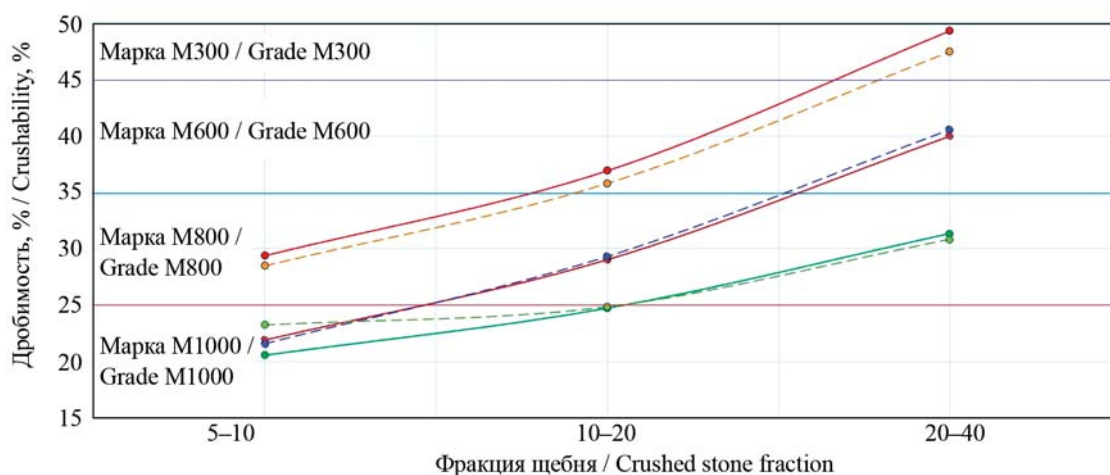


Рис. 4. График изменения дробимости по фракциям от сжигания кузнецкого угля: ● — сухой плотный; ● — насыщенный плотный; ● — сухой-пористый; ● — насыщенный пористый; от сжигания канско-ачинского угля: ● — сухой плотный; ● — насыщенный плотный

Fig. 4. Crushability broken down by the fractions generated in the course of burning Kuznetsk coal: ● — dry and dense; ● — saturated and dense; ● — dry and porous; ● — saturated and porous; broken down by the fractions generated in the course of burning Kansk-Achinsk coal: ● — dry and dense; ● — saturated and dense

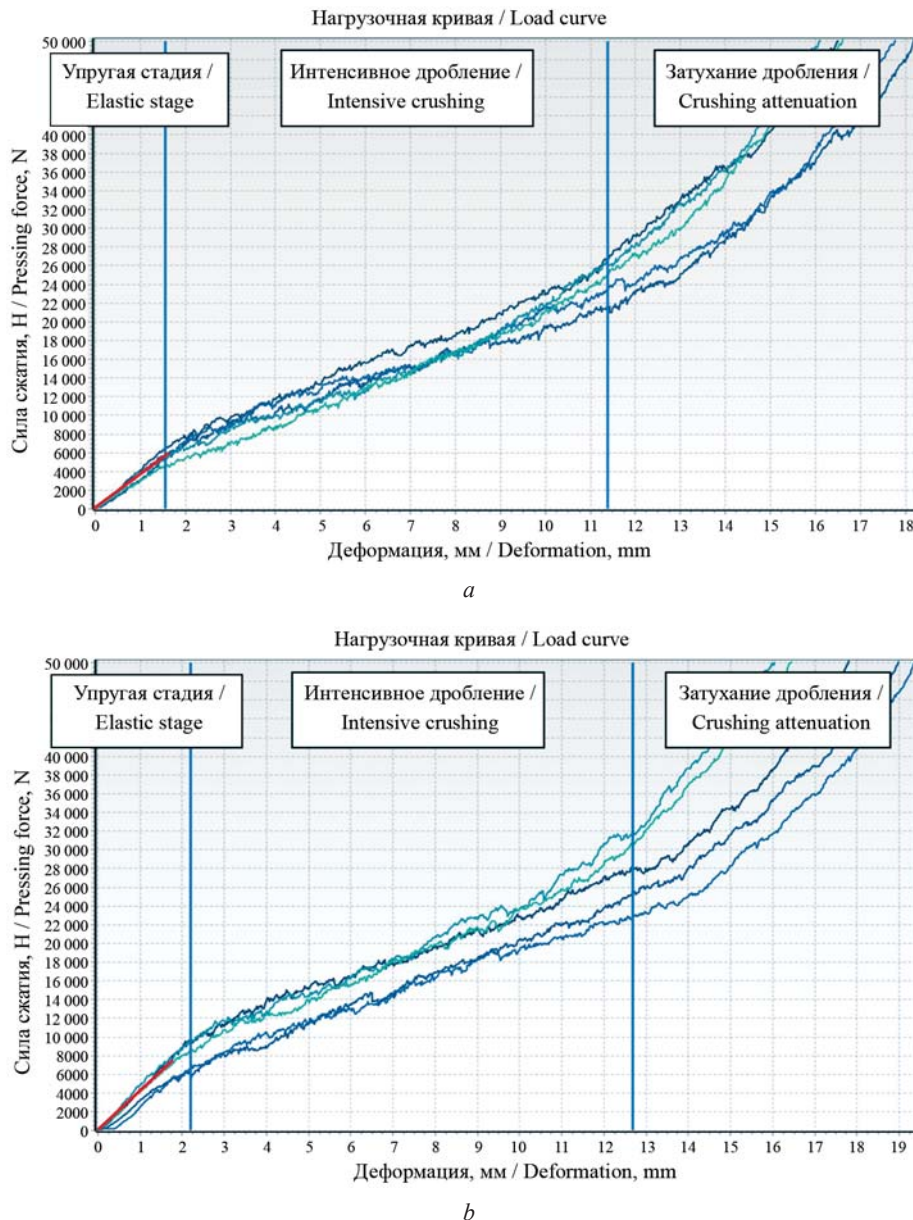


Рис. 5. Примеры графиков осадки штампа от нагрузки в ходе испытаний золошлакового щебня: *a* — щебень от сжигания кузнецкого угля; *b* — щебень от сжигания канско-ачинского угля

Fig. 5. Examples of graphs describing stamp settlement in case of exposure to the load in the process of slag crushed stone testing: *a* — crushed stone generated as a result of burning the Kuznetsk coal; *b* — crushed stone generated as a result of burning the Kansk-Achinsk coal

классификации золошлакового щебня по прочности (имеется только для шлаков металлургии и фосфорного производства — ГОСТ 3344-83 и ГОСТ 32826-2014), для определения марки выбраны граничные значения, предусмотренные для шлаков черной металлургии по ГОСТ 3344-83 (как ближайшего аналога).

В процессе испытания условно выделялось три стадии поведения сжимаемого материала: упругая стадия (деформации материала восстанавливаются, дробление отсутствует), интенсивное дробление (начало дробления частиц каждую секунду) и затухание дробления (снижение интенсивности дробления частиц, несмотря на ускоренный рост напряжений). Графики проведенных испытаний приведены на рис. 5.

Упругая стадия характеризуется низкой частотой разрушений частиц, поэтому перемещения штампа вероятнее всего связаны с деформациями отдельных частиц и их переупаковкой (уплотнение). Максимальный уровень нормальных напряжений для этой стадии составлял 450–2200 кПа (который уменьшался с ростом крупности частиц золошлакового щебня и изменялся в зависимости от генезиса

Упругая стадия характеризуется низкой частотой разрушений частиц, поэтому перемещения штампа вероятнее всего связаны с деформациями отдельных частиц и их переупаковкой (уплотнение). Максимальный уровень нормальных напряжений для этой стадии составлял 450–2200 кПа (который уменьшался с ростом крупности частиц золошлакового щебня и изменялся в зависимости от генезиса

золошлакового щебня). Представленный уровень напряжений выше, чем создаваемый транспортными нагрузками в основаниях дорожных одежд (от 200 до 300 кПа).

Рост уровня напряжений в массиве золошлакового щебня от величины, соответствующей границе упругой стадии, до уровня в 3300–7250 кПа (зависит от крупности частиц и их генезиса) вызывал интенсивное дробление шлакового щебня, которое в основном было обусловлено разрушением защемленных частиц и сопровождалось существенными осадками штампа. При дальнейшем увеличении напряжений в образце начинался переход в стадию затухания дробления. Отмеченный уровень напряжений в двух вышеописанных стадиях был существенно выше, чем в дорожных конструкциях, поэтому данные стадии оказались непригодны для оценки деформационных параметров.

На начальном этапе нагружения (упругой стадии) разрушения частиц практически не фиксировались, а максимальные напряжения не превосходили вызываемые воздействием транспортных нагрузок. Поэтому деформационные характеристики ЗПС (модули деформации) определялись для материалов именно на этой стадии. Результаты полученных значений модулей упругости приведены на рис. 6.

Следует также отметить, что испытания проводились на неуплотненных образцах материала, следовательно, полученные в ходе испытаний значения, по всей видимости, будут минимально возможными модулями деформации для исследуемого материала.

Определить модуль упругости из этих экспериментов не представляется возможным, поскольку

в ходе испытаний, очевидно, происходило уплотнение и переупаковка частиц. Видимо, требуется провести сравнительные испытания по выявлению модулей упругости этого материала по методике испытаний статическим или динамическим штампом и сопоставить их с полученными значениями модулей деформации.

Содержание лещадных частиц в исследованных образцах, отобранных на отвалах ТЭЦ г. Новосибирска, оказалось ниже, чем на отвале Северской ТЭЦ (отвал ТЭЦ-2 — от 2 до 5 %, ТЭЦ-3 — от 0 до 3 %, Северская ТЭЦ — от 7 до 20 %). Во всех образцах отсутствовала глина в комках, а содержание пылеватых частиц не превосходило 1,5 %. Содержание потерь при прокаливании в исследованных образцах изменялось от 0,6 до 2,1 %, причем большие значения соответствовали меньшей фракции.

Результаты испытаний (рис. 4) показывают, что дробимость золошлакового щебня растет с ростом крупности частиц независимо от генезиса материала. По всей видимости, это вызвано тем, что с увеличением крупности частиц уменьшается число их контактов, что ведет к повышению контактных напряжений (опыты R. Beringher). Рост контактных напряжений в крупных фракциях снижает критическую длину трещин Гриффитса, а поскольку размер естественных трещин в частицах имеет сопоставимый размер, разрушение крупных частиц идет при меньшем уровне нагрузки.

Особенности механизма развития трещин Гриффитса объясняют меньшую прочность щебневых частиц, получаемых от сжигания кузнецкого угля. Повышенная температура плавления породобразующих компонентов в кузнецких углях

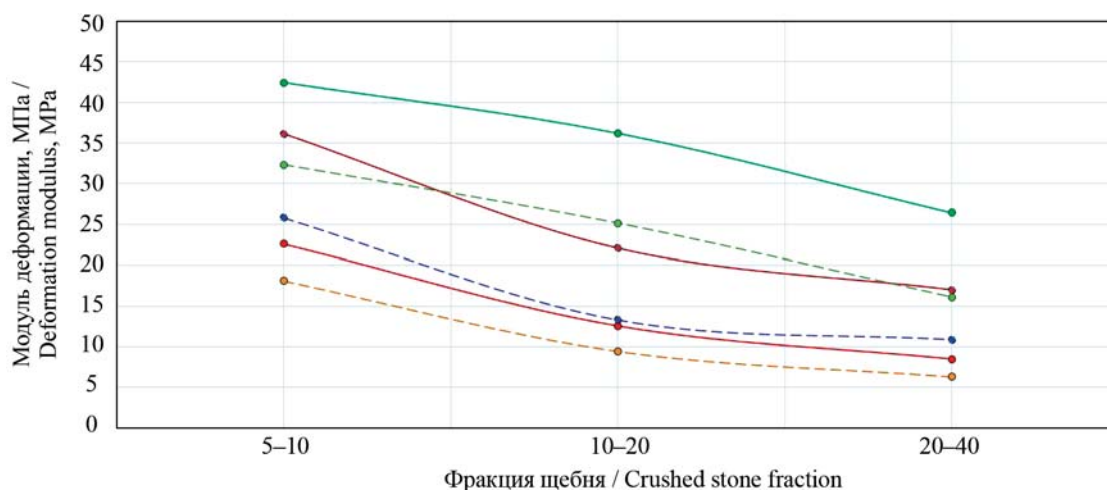


Рис. 6. Модули деформации образцов золошлакового щебня от сжигания кузнецкого угля: ● — сухой плотный; ● — насыщенный плотный; ● — сухой пористый; ● — насыщенный пористый; от сжигания канско-ачинского угля: ● — сухой плотный; ● — насыщенный плотный

Fig. 6. Deformation moduli of slag crushed stone samples generated as a result of burning the Kuznetsk coal: ● — dry and dense; ● — saturated and dense; ● — dry and porous; ● — saturated and porous; generated as a result of burning the Kansk-Achinsk coal: ● — dry and dense; ● — saturated and dense

обеспечивает повышенное количество раковин, неровностей и трещин, нежели в образцах канско-ачинской ЗШС. Это, в свою очередь, требует меньшего уровня напряжений для достижения естественными трещинами уровня критического размера. Причина снижения прочности пористых частиц от сжигания кузнецкого угля, отобранных на Северской ТЭЦ, вероятнее всего, заключается в наличии высокого числа игольчатых и лещадных частиц, которые не дают массиву создавать устойчивый скелет для сопротивления нагрузкам.

Влияние влажности на механическую прочность образцов практически не обнаружено, исключением можно считать только образец золошлакового щебня от сжигания канско-ачинского угля фракции 5–10 мм. Объяснить этот эффект наличием растворимых частиц (потери при прокаливании, отмучивание) не представляется возможным в связи с их незначительным количеством. Предположительно это связано с тем, что для мелких частиц с остеклованной поверхностью (плотный остеклованный шлак) водные пленки сыграли роль смазки, это вызвало более интенсивную переупаковку частиц и разрушение частиц, которые плотно защемлялись в массиве и не имели возможности переупаковки.

Влияние химического состава, по всей видимости, не играет первостепенной роли. Менее плотные частицы, отобранные с Северской ТЭЦ, имеют более высокую дробимость, чем сходные образцы с Новосибирской ТЭЦ-2. Вероятнее всего, ключевую роль оказывает форма частиц (содержание лещадки) и механизм агрегации материала (сухое или жидкое шлакоудаление).

Как и в работах [32–34] было отмечено, что влажность влияет на деформационные способности материала, снижая их. Для материала с Новосибир-

ской ТЭЦ-3 снижение составило от 24 до 39 %, с Новосибирской ТЭЦ-2 — от 29 до 36 %, а с Северской ТЭЦ — от 20 до 26 %. Предположение о возможном влиянии на прочность глинистых частиц оказалось несостоятельным, в связи со сходной их концентрацией. Было установлено, что влажность существенно снижает деформационные параметры плотных шлаковых частиц и в меньшей степени пористые частицы, поверхность которых не так подвергнута смазывающему влиянию воды, что подтверждается работами [35, 36].

В пробах золошлакового щебня с отвалов Новосибирских ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 содержание пластинчатых и игольчатых частиц не превосходило 5 %. Это обусловлено особенностями грануляции шлака в котлах с жидким шлакоудалением. Перегретый расплав за счет сил поверхностного натяжения стремится принять сферическую форму, однако из-за разницы температур создает кипение жидкости и застывает в кубовидной форме. Повышенная температура плавления порообразующих компонентов ЗШС от сжигания кузнецких углей, по сравнению с ЗШС от сжигания канско-ачинских углей, обуславливает большее количество трещин и неровностей. В то же время образцы щебня Северской ТЭЦ обладают высокой дробимостью и содержанием лещадки до 20 %, благодаря сухому характеру грануляции шлака.

Также при анализе результатов выполненных исследований была обнаружена корреляционная связь между значениями дробимости и модулями деформации золошлакового щебня (рис. 7). При этом генезис щебеночного материала не показал существенного влияния на форму зависимости, в то время как изменение влажности смещает полученные значения в зону уменьшения модулей деформации.

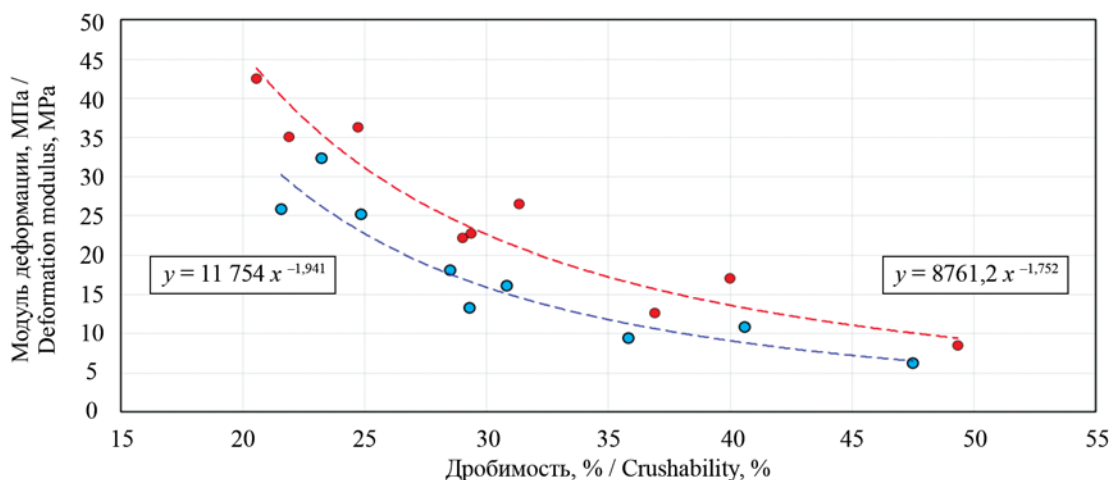


Рис. 7. Зависимость между величиной дробимости и модулем деформации золошлакового щебня: ● — в сухом состоянии; ● — в водонасыщенном состоянии

Fig. 7. The relationship between crushability and the deformation modulus of the slag crushed stone: ● — in the dry condition; ● — in the saturated condition

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках обсуждения могут быть вынесены возможные перспективы развития рассматриваемой темы.

Результаты оценки дробимости золошлакового щебня, полученного от сжигания канско-ачинского и кузнецкого углей, показывают, что:

- исследованный материал изменяет свою марку по прочности в зависимости от генезиса и размера зерен от М300 до М1000;
- золошлаковый щебень значительно меняет свою механическую прочность в зависимости от фракции (дробимость фракции 20–40 может быть до 67 % выше, чем фракции 5–10 того же материала);
- на величину дробимости практически не оказывает влияние влажность испытуемого образца, поскольку ее влияние было замечено только в одной серии экспериментов и может быть случайным;
- химический состав, вероятнее всего, не оказывает решающего воздействия на дробимость, наибольшую роль оказывают форма частиц (рост содержания лещадки снижает прочность щебня) и механизм агрегации материала (сухое или жидкое шлакоудаление).

Результаты оценки модулей деформации золошлакового щебня, полученного от сжигания канско-ачинского и кузнецкого углей, демонстрируют, что:

• влажность снижает деформационные способности золошлакового щебня, причем снижение находится в интервалах от 20 до 39 %. Большие значения характерны для плотного шлака из системы жидкого шлакоудаления с остеклованной поверхностью, а меньшие — для пористого шлака из системы сухого шлакоудаления;

• наиболее высоким модулем упругости обладает золошлаковый щебень из плотного шлака, который образован в системе жидкого шлакоудаления и имеет остеклованную поверхность, а наименьшим — щебень из пористого шлака, получаемый в системе сухого шлакоудаления.

Также следует отметить, что в ходе исследований были обнаружены устойчивые корреляции между величиной дробимости и модулем упругости золошлакового щебня (в сухом и насыщенном состоянии), которые хотя и требуют проверки, позволяют укрупненно оценивать несущую способность этого материала по величине дробимости.

Исследование показало, что с позиции механической прочности (и на основании результатов дополнительных исследований) данные материалы могут быть использованы для возведения земляного полотна автомобильных дорог, строительства дополнительных слоев оснований дорожных одежд, в конструкциях несущих слоев оснований дорожных одежд, а также, вероятно, пригодны для выполнения планировочных работ и материала обратных засыпок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bhatt A., Priyadarshini S., Mohanakrishnan A.A., Abri A., Sattler M., Techapaphawit S. Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review // *Case Studies in Construction Materials*. 2019. Vol. 11. P. e00263. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00263
2. Пичугин Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций // *Проблемы региональной экологии*. 2019. № 4. С. 77–87. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077
3. Bartov G., Deonarine A., Johnson T.M., Ruhl L., Vengosh A., Hsu-Kim H. Environmental Impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston Coal Ash Spill. 1. Source Apportionment Using Mercury Stable Isotopes // *Environmental Science & Technology*. 2013. Vol. 47. Issue 4. Pp. 2092–2099. DOI: 10.1021/es303111p
4. Deonarine A., Bartov G., Johnson T.M., Ruhl L., Vengosh A., Hsu-Kim H. Environmental Impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston Coal Ash Spill. 2. Effect of Coal Ash on Methylmercury in Historically Contaminated River Sediments // *Environmental Science & Technology*. 2013. Vol. 47. Issue 4. Pp. 2100–2108. DOI: 10.1021/es303639d
5. Shin J., Natanson A., Khun J., Odorizzi N., DeCreny-Jackson J., Fowowe H. et al. Research Article: Assessing the impact of coal ash exposure on soil microbes in the Dan River // *BIOS*. 2017. Vol. 88. Issue 2. Pp. 72–85. DOI: 10.1893/BIOS-D-16-00006.1
6. Malchik A.G., Litovkin S.V., Rodionov P.V., Kozik V.V., Gaydamak M.A. Analyzing the Technology of Using Ash and Slag Waste from Thermal Power Plants in the Production of Building Ceramics // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 127. P. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/127/1/012024
7. Lihach S.A., Kulesh R.N., Nikolaeva V.I., Orlova K.Y., Ilyasova A.S. Power plant ash and slag waste management technological direction when Kansk-Achinsk brown coal is burned // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 92. P. 01051. DOI: 10.1051/mateconf/20179201051
8. Kishor P., Ghosh A.K., Kumar D. Use of Flyash in Agriculture: A Way to Improve Soil Fertility and its Productivity // *Asian Journal of Agricultural Research*. 2010. Vol. 4. Issue 1. Pp. 1–14. DOI: 10.3923/ajar.2010.1.14

9. Valeev D., Kunilova I., Alpatov A., Mikhailova A., Goldberg M., Kondratiev A. Complex utilisation of ekibastuz brown coal fly ash: Iron & carbon separation and aluminum extraction // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 218. Pp. 192–201. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.342
10. Folgueras M.B., Alonso M., Fernández F.J. Coal and sewage sludge ashes as sources of rare earth elements // *Fuel*. 2017. Vol. 192. Pp. 128–139. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.12.019
11. Барахтенко В.В. Оценка потребительских характеристик изделий из высоконаполненного полимерно-минерального композиционного материала на основе поливинилхлорида и отходов ТЭС // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 3 (47). С. 17–24. DOI: 10.5862/MCE.47.2
12. Бурдонов А.Е., Барахтенко В.В., Зелинская Е.В., Сутурина Е.О., Бурдонова А.В., Головнина А.В. Физико-механические характеристики композиционных материалов на основе отходов производства с различными рецептурами // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 9 (35). С. 14–22.
13. Yao Z.T., Ji X.S., Sarker P.K., Tang J.H., Ge L.Q., Xia M.S. et al. A comprehensive review on the applications of coal fly ash // *Earth-Science Reviews*. 2015. Vol. 141. Pp. 105–121. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.11.016
14. Лебедев М.С., Чулкова И.Л. Исследование реологических свойств битумных композиций, наполненных золами-уноса различного состава // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016. № 11. С. 47–52. DOI: 10.12737/22365
15. Толстой А.Д., Ковалева И.А., Новиков К.Ю. Совершенствование состава и свойств порошковых бетонов с техногенным сырьем // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016. № 2. С. 19–24.
16. Sushovan D., Nadaf M.B., Mandal J.N. An Overview on the Use of Waste Plastic Bottles and Fly Ash in Civil Engineering Applications // *Procedia Environmental Sciences*. 2016. Vol. 35. Pp. 681–691. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.07.067
17. Hadbaatar A., Mashkin N.A., Stenina N.G. Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. Pp. 1558–1562. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.111
18. Сиротюк В.В., Лунев А.А., Иванов Е.В. Золошлаковая смесь для земляного полотна // *Автомобильные дороги*. 2016. № 6 (1015). С. 72–79.
19. Sikora Z., Ossowski R. Geotechnical Aspects of Dike Construction Using Soil-Ash Composites // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 57. Pp. 1029–1035. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.130
20. Haleem A., Luthra S., Mannan B., Khurana S., Kumar S., Ahmad S. Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing Indian perspective // *Resources Policy*. 2016. Vol. 49. Pp. 334–348. DOI: 10.1016/j.resourpol.2016.07.002
21. He Y., Luo Q., Hu H. Situation Analysis and Countermeasures of China's Fly Ash Pollution Prevention and Control // *Procedia Environmental Sciences*. 2012. Vol. 16. Pp. 690–696. DOI: 10.1016/j.proenv.2012.10.095
22. Zhu P., Dai H., Han L., Xu X., Cheng L., Wang Q., Shi Z. Aluminum extraction from coal ash by a two-step acid leaching method // *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. 2015. Vol. 16. Issue 2. Pp. 161–169. DOI: 10.1631/jzus.a1400195
23. Wang Z., Dai S., Zou J., French D., Graham I.T. Rare earth elements and yttrium in coal ash from the Luzhou power plant in Sichuan, Southwest China: Concentration, characterization and optimized extraction // *International Journal of Coal Geology*. 2019. Vol. 203. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.coal.2019.01.001
24. Ma S., Xu M., Qiqige, Wang X., Zhou X. Challenges and Developments in the Utilization of Fly Ash in China // *International Journal of Environmental Science and Development*. 2017. Vol. 8. Issue 11. Pp. 781–785. DOI: 10.18178/ijesd.2017.8.11.1057
25. Mukherjee P.S. Exploring Fly Ash Utilization in Construction of Highways in India // *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2013. Vol. 8. Issue 4. Pp. 23–32. DOI: 10.9790/1684-0842332
26. Mathur A.K., Khandekar R.K. New segments in ash utilization — NTPC concern // *Proc. on Indian Power Station Conference*. 2008. Pp. 627–631.
27. Shamshad A., Fulekar M.H., Bhawana P. Impact of Coal Based Thermal Power Plant on Environment and its Mitigation Measure // *Research Journal of Environment Sciences*. 2012. Vol. 1 (4). Pp. 60–64.
28. Ватин Н.И., Петросов Д.В., Калачев А.И., Лахтинен П. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве // *Инженерно-строительный журнал*. 2011. № 4 (22). С. 16–21.
29. Behringer R.P. Jamming in granular materials // *Comptes Rendus Physique*. 2015. Vol. 16. Issue 1. Pp. 10–25. DOI: 10.1016/j.crhy.2015.02.001
30. Takahashi T., Clark A.H., Majmudar T., Kondic L. Granular response to impact: Topology of the force networks // *Physical Review E*. 2018. Vol. 97. Issue 1. DOI: 10.1103/PhysRevE.97.012906
31. Clark A.H., Petersen A.J., Kondic L., Behringer R.P. Nonlinear Force Propagation During Granular Impact // *Physical Review Letters*. 2015. Vol. 114. Issue 14. DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.144502
32. Indraratna B., Nulalaya P., Koo K.S., Kuganenthira N. Engineering behaviour of a low carbon, pozzolanic fly ash and its potential as a construction fill // *Canadian Geotechnical Journal*. 1991. Vol. 28. Issue 4. Pp. 542–555. DOI: 10.1139/t91-070
33. Marto A., Awang A.R., Makhtar A.M. Compaction Characteristics and Permeability of Tanjung Bin Coal Ash Mixtures // *International Conference on*

Environment Science and Engineering IPCBEE. 2011. Vol. 8. Pp. 134–137.

34. Kumar D., Kumar N., Gupta A. Geotechnical Properties of Fly Ash and Bottom Ash Mixtures in Different Proportions // International Journal of Science and Research (IJSR). 2014. Vol. 3. Issue 9. Pp. 1487–1494.

35. Tiwari S.K., Ghiya A. Strength Behavior of Compacted Fly Ash, Bottom Ash and their Combina-

tions // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2013. Vol. 18. Pp. 3085–3106.

36. Gimhan P.G.S., Disanayaka J.P.B., Nasvi M. Geotechnical Engineering Properties of Fly Ash and Bottom Ash: Use as Civil Engineering Construction Material // Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka. 2018. Vol. 51. Issue 1. P. 49. DOI: 10.4038/engineer.v51i1.7287

Поступила в редакцию 29 апреля 2020 г.

Принята в доработанном виде 20 мая 2020 г.

Одобрена для публикации 26 июня 2020 г.

ОБ АВТОРЕ: Александр Александрович Лунев — кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательского управления; Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ); 644080, г. Омск, пр-т. Мира, д. 5; РИНЦ ID: 827499, Scopus: 57198893763, ORCID: 0000-0001-5857-1891; lunev.al.al@gmail.com.

REFERENCES

1. Bhatt A., Priyadarshini S., Mohanakrishnan A.A., Abri A., Sattler M., Techapaphawit S. Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review. *Case Studies in Construction Materials*. 2019; 11:e00263. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00263

2. Pichugin E.A. Analytical review of the experience of involving ash slag waste of thermal power plants in economic circulation in the russian federation. *Regional Environmental Issues*. 2019; 4:77-87. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077 (rus.).

3. Bartov G., Deonarine A., Johnson T.M., Ruhl L., Vengosh A., Hsu-Kim H. Environmental Impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston Coal Ash Spill. 1. Source Apportionment Using Mercury Stable Isotopes. *Environmental Science & Technology*. 2013; 47(4):2092-2099. DOI: 10.1021/es303111p

4. Deonarine A., Bartov G., Johnson T.M., Ruhl L., Vengosh A., Hsu-Kim H. Environmental Impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston Coal Ash Spill. 2. Effect of Coal Ash on Methylmercury in Historically Contaminated River Sediments. *Environmental Science & Technology*. 2013; 47(4):2100-2108. DOI: 10.1021/es303639d

5. Shin J., Natanson A., Khun J., Odorizzi N., DeCreny-Jackson J., Fowowe H. et al. Research Article: Assessing the impact of coal ash exposure on soil microbes in the Dan River. *BIOS*. 2017; 88(2):72-85. DOI: 10.1893/BIOS-D-16-00006.1

6. Malchik A.G., Litovkin S.V., Rodionov P.V., Kozik V.V., Gaydamak M.A. Analyzing the Technology of Using Ash and Slag Waste from Thermal Power Plants in the Production of Building Ceramics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016; 127:012024. DOI: 10.1088/1757-899X/127/1/012024

7. Lihach S.A., Kulesh R.N., Nikolaeva V.I., Orlova K.Y., Ilyasova A.S. Power plant ash and slag waste management technological direction when Kansk-Achinsk brown coal is burned. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 92:01051. DOI: 10.1051/mateconf/20179201051

8. Kishor P., Ghosh A.K., Kumar D. Use of Flyash in Agriculture: A Way to Improve Soil Fertility and its Productivity. *Asian Journal of Agricultural Research*. 2010; 4(1):1-14. DOI: 10.3923/ajar.2010.1.14

9. Valeev D., Kunilova I., Alpatov A., Mikhailova A., Goldberg M., Kondratiev A. Complex utilisation of ekibastuz brown coal fly ash: Iron & carbon separation and aluminum extraction. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 218:192-201. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.342

10. Folgueras M.B., Alonso M., Fernández F.J. Coal and sewage sludge ashes as sources of rare earth elements. *Fuel*. 2017; 192:128-139. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.12.019

11. Barahtenko V.V. Estimating consumer product characteristics of highly filled polymer-mineral composite material based on polyvinyl chloride and waste TPP. *Magazine of Civil Engineering*. 2014; 3(47):17-24. DOI: 10.5862/MCE.47.2 (rus.).

12. Burdonov A.E., Barahtenko V.V., Zelinskaya E.V., Suturina E.O., Burdonova A.V., Golovkina A.V. Physical and mechanical properties of composite materials of different compositions based on waste products. *Magazine of Civil Engineering*. 2012; 9(35):14-22. (rus.).

13. Yao Z.T., Ji X.S., Sarker P.K., Tang J.H., Ge L.Q., Xia M.S. et al. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews*. 2015; 141:105-121. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.11.016

14. Lebedev M.S., Chulkova I.L. Study of rheological characteristics of bitumen composites with

different fly ashes. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2016; 11:47-52. DOI: 10.12737/22365 (rus.).

15. Tolstoj A.D., Kovaleva I.A., Novikov K.Y.U. Improving the structure and properties of powdered concrete on technogenic raw materials. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2016; 2:19-24. (rus.).

16. Sushovan D., Nadaf M.B., Mandal J.N. An Overview on the Use of Waste Plastic Bottles and Fly Ash in Civil Engineering Applications. *Procedia Environmental Sciences*. 2016; 35:681-691. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.07.067

17. Hadbaatar A., Mashkin N.A., Stenina N.G. Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction. *Procedia Engineering*. 2016; 150:1558-1562. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.111

18. Sirotiyuk V.V., Lunev A.A., Ivanov E.V. Coal ash and slag for road embankment. *Car Roads*. 2016; 6:72-79. (rus.).

19. Sikora Z., Ossowski R. Geotechnical Aspects of Dike Construction Using Soil-Ash Composites. *Procedia Engineering*. 2013; 57:1029-1035. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.130

20. Haleem A., Luthra S., Mannan B., Khurana S., Kumar S., Ahmad S. Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing Indian perspective. *Resources Policy*. 2016; 49:334-348. DOI: 10.1016/j.resourpol.2016.07.002

21. He Y., Luo Q., Hu H. Situation Analysis and Countermeasures of China's Fly Ash Pollution Prevention and Control. *Procedia Environmental Sciences*. 2012; 16:690-696. DOI: 10.1016/j.proenv.2012.10.095

22. Zhu P., Dai H., Han L., Xu X., Cheng L., Wang Q., Shi Z. Aluminum extraction from coal ash by a two-step acid leaching method. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. 2015; 16(2):161-169. DOI: 10.1631/jzus.a1400195

23. Wang Z., Dai S., Zou J., French D., Graham I.T. Rare earth elements and yttrium in coal ash from the Luzhou power plant in Sichuan, Southwest China: Concentration, characterization and optimized extraction. *International Journal of Coal Geology*. 2019; 203:1-14. DOI: 10.1016/j.coal.2019.01.001

24. Ma S., Xu M., Qiqige, Wang X., Zhou X. Challenges and Developments in the Utilization of Fly Ash in China. *International Journal of Environmental Science and Development*. 2017; 8(11):781-785. DOI: 10.18178/ijesd.2017.8.11.1057

25. Mukherjee P.S. Exploring Fly Ash Utilization in Construction of Highways in India. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2013; 8(4):23-32. DOI: 10.9790/1684-0842332

26. Mathur A.K., Khandekar R.K. New segments in ash utilization — NTPC concern. *Proc. on Indian Power Station Conference*. 2008; 627-631.

27. Shamshad A., Fulekar M.H., Bhawana P. Impact of Coal Based Thermal Power Plant on Environment and its Mitigation Measure. *Research Journal of Environment Sciences*. 2012; 1(4):60-64.

28. Vatin N.I., Petrosov D.V., Kalachev A.I., Lakhtinen P. Use of ashes and ash-and-slag wastes in construction. *Magazine of Civil Engineering*. 2011; 4(22):16-21. (rus.).

29. Behringer R.P. Jamming in granular materials. *Comptes Rendus Physique*. 2015; 16(1):10-25. DOI: 10.1016/j.crhy.2015.02.001

30. Takahashi T., Clark A.H., Majmudar T., Kondic L. Granular response to impact: Topology of the force networks. *Physical Review E*. 2018; 97(1). DOI: 10.1103/PhysRevE.97.012906

31. Clark A.H., Petersen A.J., Kondic L., Behringer R.P. Nonlinear Force Propagation During Granular Impact. *Physical Review Letters*. 2015; 114(14). DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.144502

32. Indraratna B., Nulalaya P., Koo K.S., Kuganenthira N. Engineering behaviour of a low carbon, pozzolanic fly ash and its potential as a construction fill. *Canadian Geotechnical Journal*. 1991; 28(4):542-555. DOI: 10.1139/91-070

33. Marto A., Awang A.R., Makhtar A.M. Compaction Characteristics and Permeability of Tanjung Bin Coal Ash Mixtures. *International Conference on Environment Science and Engineering IPCBEE*. 2011; 8:134-137.

34. Kumar D., Kumar N., Gupta A. Geotechnical Properties of Fly Ash and Bottom Ash Mixtures in Different Proportions. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2014; 3(9):1487-1494.

35. Tiwari S.K., Ghiya A. Strength Behavior of Compacted Fly Ash, Bottom Ash and their Combinations. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2013; 18:3085-3106.

36. Gimhan P.G.S., Disanayaka J.P.B., Nasvi M. Geotechnical Engineering Properties of Fly Ash and Bottom Ash: Use as Civil Engineering Construction Material. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*. 2018; 51(1):49. DOI: 10.4038/engineer.v51i1.7287

Received April 29, 2020

Adopted in a revised form on May 20, 2020.

Approved for publication June 26, 2020

BIONOTES: **Aleksandr A. Lunev** — Candidate of Technical Sciences, research associate of the research Department; **The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)**; 5 Mira avenue, Omsk, 644080, Russian Federation; ID RISC: 827499, Scopus: 57198893763, ORCID: 0000-0001-5857-1891; lunev.al.al@gmail.com.

Выявление внутренних дефектов бетонирования в теле монолитной фундаментной плиты по данным георадиолокационного обследования

Е.О. Зеркаль, А.Ю. Калашников, А.Е. Лапшинов, А.И. Тютюнкков

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрели монолитный железобетонный плитный ростверк на свайном основании строящегося многоэтажного корпуса жилого комплекса. Цель работы — получение достоверной информации о внутренней структуре фундаментной плиты, а также определение и картирование внутренних дефектов в случае их наличия. Данное исследование направлено на отражение возможных проблем при проведении обследования фундамента, а также на популяризацию георадиолокационных методов, которая может повлечь за собой оптимизацию рабочих процессов при проведении обследовательских работ.

Материалы и методы. Использовали метод георадиолокационной съемки, выполненной по регулярной сети ортогональных профилей на доступной для исследования поверхности плитного ростверка с применением нескольких антенн с центральными несущими частотами зондирующего сигнала 1500 и 2000 МГц.

Результаты. В структуре фундаментной плиты обнаружили ряд дефектов внутреннего строения: несколько горизонтальных холодных швов бетонирования, пустоты и отдельные каверны, наличие которых было затем подтверждено контрольным бурением с отбором кернового материала. Полученная информация обобщена в карты поверхностей горизонтальных холодных швов бетонирования, отражающие как рельеф, так и распределение выявленных дефектов в пространстве. Анализ сколов керна показал, что отражающие границы совпадают с границами разрушения керна, а также наличие воздушных полостей и следов некачественного уплотнения бетонной смеси.

Выводы. Метод георадиолокационной съемки обладает достаточно высокой разрешающей способностью для выявления структурно значимых особенностей строения железобетонных плит, что позволяет получить достоверную информацию о внутреннем строении тела фундаментной плиты и судить о наличии или отсутствии внутренних дефектов конструкции, таких как холодные швы бетонирования, пустоты или каверны.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: георадар, фундаментная плита, дефект, шов бетонирования, обследование конструкций, ростверк, сваи

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зеркаль Е.О., Калашников А.Ю., Лапшинов А.Е., Тютюнкков А.И. Выявление внутренних дефектов бетонирования в теле монолитной фундаментной плиты по данным георадиолокационного обследования // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 7. С. 980–987. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.980-987

Using ground penetrating radars to detect internal defects in concrete foundation slabs

Evgeny O. Zerkal, Alexey Yu. Kalashnikov, Andrey E. Lapshinov,
Aleksey I. Tyutyunkov

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The co-authors have analyzed a monolithic reinforced concrete piled raft foundation of a multi-storied residential building under construction. The mission of this research effort is to obtain trustworthy information about the internal structure of a foundation slab, to detect and survey internal defects, if any. This research project is to capture potential problems that may accompany the inspection of a foundation, to generate awareness about ground penetrating radar surveys and their methods that can help to optimize operating processes in the process of inspection.

Materials and methods. The co-authors have employed a method of ground penetrating radar surveying, performed using a regular mesh of orthogonal projections over an easily accessible surface area of a raft foundation and several antennas producing sounding signals with centre frequencies varying within the range of 1,500 and 2,000 MHz.

Results. A number of internal defects has been detected in the structure of a foundation slab, including several horizontal cold joints, cavity pockets and honeycombs. Their presence was later confirmed by control drilling and core material sampling. The information thus obtained was later generalized and entered into surface maps of cold joints, that depicted both the relief and the layout of detected defects in space. The analysis of core material chips has proven that reflecting boundaries are the same as those of the core material destruction; it has also demonstrated the presence of air pockets and the proofs of poor quality concrete mix compaction.

Conclusions. The resolution of the ground penetrating radar method is sufficient to identify features of reinforced concrete slabs significant for their structure; it enables researchers to obtain trustworthy information about the internal structure of a foundation slab and make conclusions about the presence or absence of internal defects inside it, including cold joints, cavity pockets or honeycombs.

KEYWORDS: ground penetrating radar, foundation slab, defect, concrete joint, inspection of structures, raft, piles

FOR CITATION: Zerkal E.O., Kalashnikov A.Yu., Lapshinov A.E., Tyutyunkov A.I. Using ground penetrating radars to detect internal defects in concrete foundation slabs. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(7):980-987. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.980-987 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Монолитные железобетонные фундаментные плиты в настоящее время часто используют при возведении различных зданий и сооружений, в частности многоэтажных жилых домов. Особенно эффективными фундаментные плиты могут быть при строительстве в сейсмически активных районах, на слабых грунтах, на участках с неглубоким залеганием грунтовых вод, на пучинистых и проседающих грунтах.

Обследуемая строительная конструкция представляет собой монолитную железобетонную фундаментную плиту, выполняющую роль плитного ростверка под строящийся 25-этажный жилой дом.

Исследование фундаментной плиты вызвано ее длительным бетонированием и образованием видимого холодного шва под верхней арматурной сеткой, обнаруженного в ходе проведения авторского надзора и строительного контроля.

Фундаментом под стены обследуемого корпуса является плитный ростверк из монолитной железобетонной фундаментной плиты толщиной 1,2 м. Рассматриваемая фундаментная плита имеет размеры 47,42 × 18,12 м. Общая высота здания, включая надземную и подземную часть, с отметки верха фундаментной плиты до отметки плиты покрытия составляет ≈ 80 м.

Армирование плитного ростверка осуществляется двумя сетками — верхней и нижней. Фоновое (основное) верхнее и нижнее армирование ростверка производится арматурой Ø22 класса А500С с шагом 250 мм в продольном и поперечном направлениях. По торцам ростверка установлены гнутые П-образные арматурные элементы из Ø22 класса А500С. В связи с большой толщиной ростверка в средней зоне для распределения тепла, образующегося при твердении бетона, установлена дополнительная конструктивная сетка из стержней Ø12 класса А500С с шагом 400 × 400 мм. По боковой поверхности ростверка также дополнительно установлены прямые стержни Ø12 класса А500С. Защитный слой бетона до нижней арматуры верхней сетки — 50 мм, до верхней — 45 мм, до боковой — 40 мм.

В качестве основания обследуемого корпуса приняты забивные железобетонные сваи по серии 1.011.1-10, выпуск 8, квадратного сечения размером 350 × 350 мм, длиной 22,0 м. Сваи изготавливаются

из бетона класса по прочности на сжатие В25, марки W10 по водонепроницаемости, марки F100 по морозостойкости. Сваи армируются ненапрягаемой продольной рабочей арматурой Ø22 класса А400 (А-III). Сваи установлены по сетке с шагом 1,2–1,6 м. Общее количество свай составляет 358 шт. Сваи запроектированы с жестким сопряжением с плитным ростверком. После забивки свай рабочая арматура свай оголяется на высоту 450 мм. Отметка срубki свай находится выше на 50 мм относительно низа плитного ростверка.

Согласно ГОСТ 31937-2011¹, при обследовании конструкций необходимо выявить наличие возможных дефектов конструкций. Для этого используются как визуальный, так и инструментальные методы. К инструментальным методам обнаружения дефектов относится ультразвуковой метод. Однако толщина обследуемой в данном конкретном случае конструкции и односторонний доступ к ней крайне затрудняют использование данного метода.

Применение неинвазивных методов исследования, к которым можно отнести большинство геофизических методов, ключевых элементов конструкции зданий позволяет получить информацию о строении исследуемого объекта, не компрометируя несущую способность последнего. Среди множества геофизических методов, используемых для оценки технического состояния конструктивных элементов, стоит выделить метод георадиолокации, который, ввиду высоких производительности и разрешающей способности, сравнительно высокой глубинности, с успехом применяется при решении подобных задач [2].

Обзор литературы показывает, что метод георадиолокации успешно используется при проведении инженерных изысканий в строительстве как при исследованиях, направленных на поиск и определение особенностей строения бетонных конструкций [2–4], обследования качества армирования, выполненного металлическими стержнями [5–7] и полимерными и композитными [8–10], выявление и картирование пустот в бетонном теле [11–13], в том числе при обследованиях несущих конструкций, например колонн [13, 14], мостов [15]; так и для решения различных задач, оказывающих прямое влияние на состояние железобетонных конструкций

¹ ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.

(состояние и режим увлажнения грунтов, прилегающих к железобетонным конструкциям [16–18]). В нашей стране геофизические (к которым относятся и георадиолокационный) методы для проведения инженерных изысканий в строительстве регламентированы СП 47.13330.2012². Но аналогичного стандарта по использованию георадиолокационного метода при проведении обследования железобетонных конструкций в нашей стране пока не существует. Поиск литературы показал, что за рубежом такие стандарты разработаны и успешно применяются, например, в США разработан стандарт ASTM D6432-99 (2005)³.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки технического состояния монолитной фундаментной плиты размером 48×18 м и толщиной до 1,2 м строящегося многоэтажного дома были выполнены георадиолокационные измерения по регулярной сети ортогональных профилей на доступной для исследования поверхности плитного ростверка (рис. 1). При исследованиях использовался георадар Zond-12e (Radar Systems, Inc., Рига) с применением нескольких антенн с центральными несущими частотами зондирующего сигнала 1500 и 2000 МГц. Выбор антенн обусловлен особенностями исследуемого объекта, в частности шагом стержней армирования в теле плиты, так как,

если он будет сопоставим с длиной зондирующего импульса, то слой армирования может выступить в качестве экрана, что привело бы к потере данных. Также ввиду того, что размеры вероятных дефектов строения плиты неизвестны заранее, применение методики, обеспечивающей наилучшую разрешающую способность, оптимально, что достигается уменьшением длины электромагнитной волны.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При визуальном осмотре на боковой поверхности плитного ростверка обнаружены горизонтальные швы, свидетельствующие о возможном наличии «холодных» швов бетонирования.

После обработки полученных данных георадарограммы были проанализированы с целью выработки картировочных признаков для выделения основных элементов строения плиты, зон повышенного локального увлажнения и пустот.

Строение исследуемой среды на изучаемом участке, исходя из доступной априорной информации о проектном устройстве плиты, может быть аппроксимировано с помощью трехслойной горизонтально-слоистой модели: верхний слой — монолитная бетонная плита (мощность — около 120 см); далее следует слой подготовки, представленный насыпными песчаными материалами; и самая нижняя граница — поверхность выравнивания дна котлована (кровля уплотненных коренных грунтов — преимущественно суглинков). Таким образом, на георадиолокационных профилях можно ожидать наличия трех основных отражающих границ: между основанием монолитной бетонной плиты и промежуточным слоем с гидроизоляцией, и слоем песка — кровлей коренного грунта. Они

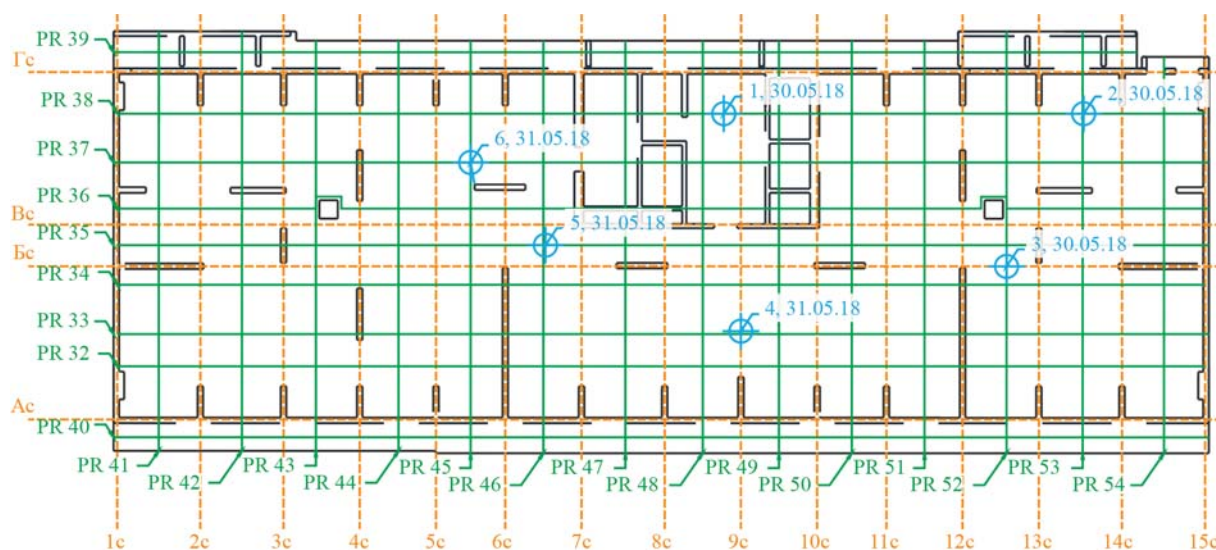


Рис. 1. Положение георадиолокационных профилей

Fig. 1. Layout of GPR profiles

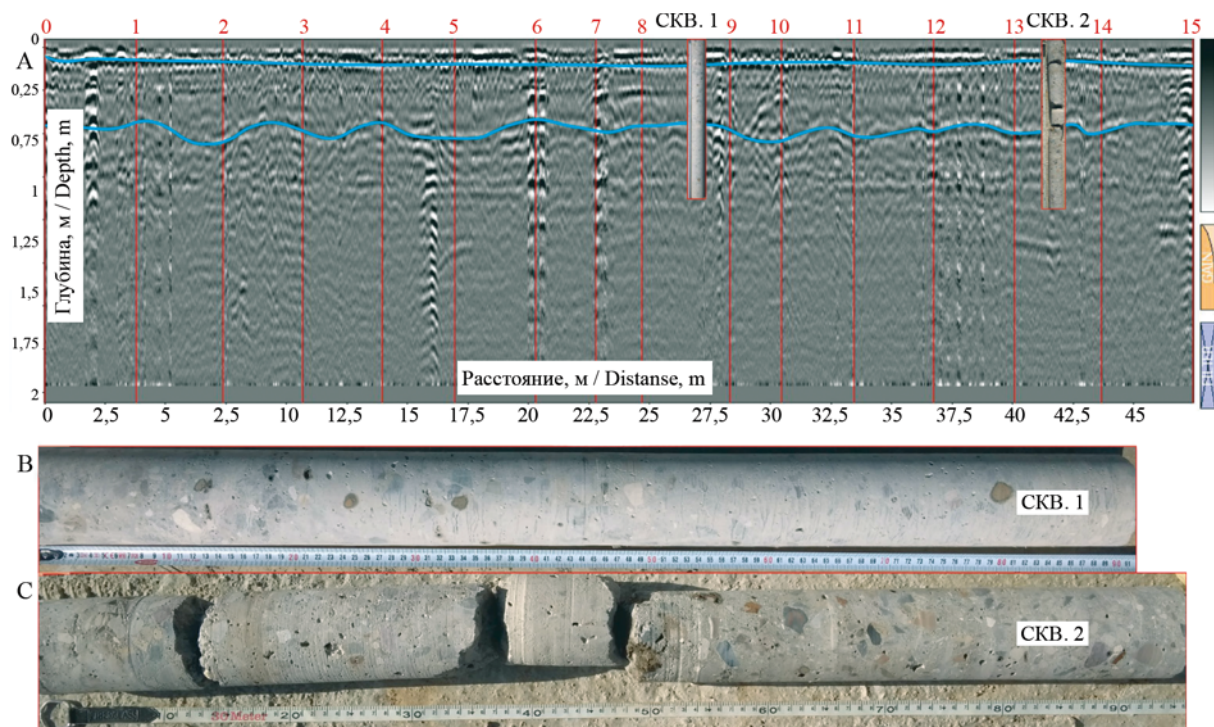


Рис. 2. Определение границ холодного контакта: А — интерпретированная радарограмма; В — керн из скважины 1; С — керн из скважины 2

Fig. 2. Identification of cold joints and their boundaries: A — an interpreted radargram; B — a drill sample; Borehole 1, C — a drill sample, Borehole 2

прослеживаются на георадарограммах в целом довольно уверенно.

Однако измерения методом георадиолокационного профилирования по площади верхней поверхности плитного ростверка показали, что строение монолитной плиты неоднородно. Это выражается в наличии участков, на которых по осям синфазности отраженных волн выделяются внутренние отражающие границы, интерпретируемые, как границы холодного контакта.

Результаты интерпретации всех полученных георадиолокационных профилей (рис. 2) могут быть обобщены в карты поверхностей горизонтальных холодных швов бетонирования (рис. 3), отражающие как рельеф, так и распределение выявленных дефектов в пространстве. Стоит отметить, что выделенные границы имеют не повсеместное распространение, что легко видеть на представленных картах.

В процессе изготовления монолитной железобетонной плиты были выявлены нарушения, которые заключались в увеличенных интервалах между заливками бетона. Ожидаемые глубины, на которых произошли нарушения — 10–20 см. При этом ожидаемые неоднородности/пустоты могут иметь размеры несколько сантиметров. Для исследования использованы две антенны с частотой 1500 и 2000 МГц. Более низкочастотная антенна применялась для исследования всей плиты по глубине,

а более высокочастотная — для глубин до 60–70 см. Так как эти глубины целевые, то для интерпретации были взяты данные, полученные с помощью антенны 2000 МГц.

Предполагается, что физические свойства монолитной плиты одинаковы в толще самой плиты. Таким образом, на радарограммах первая граница, от которой произойдет отражение, будет подошва плиты. Однако на многих радарограммах встречается несколько отражающих границ (рис. 2), примерно на глубинах 15; 25 и 50 см. Также на радарограммах хорошо видно положение арматурной сетки.

В теле фундаментной плиты могут быть выделены две границы холодного контакта (рис. 2): первая — на глубинах от 0,09 до 0,25 м; вторая — на глубинах от 0,32 до 0,7 м, что было подтверждено контрольным бурением с отбором кернов. По результатам анализа полученных радарограмм возможно построить карты глубин поверхностей холодного контакта (рис. 3, 4).

Для уточнения полученных в результате георадарного исследования данных производилось выбуривание кернов Ø74 и 143 мм из тела плитного ростверка. Выбуривание кернов проводилось на участках с выявленными отражающими границами. По результатам бурения и извлечения образцов кернов было подтверждено наличие «холодных» швов бетонирования на участках и глубинах, полученных при георадарных исследованиях. Некоторые

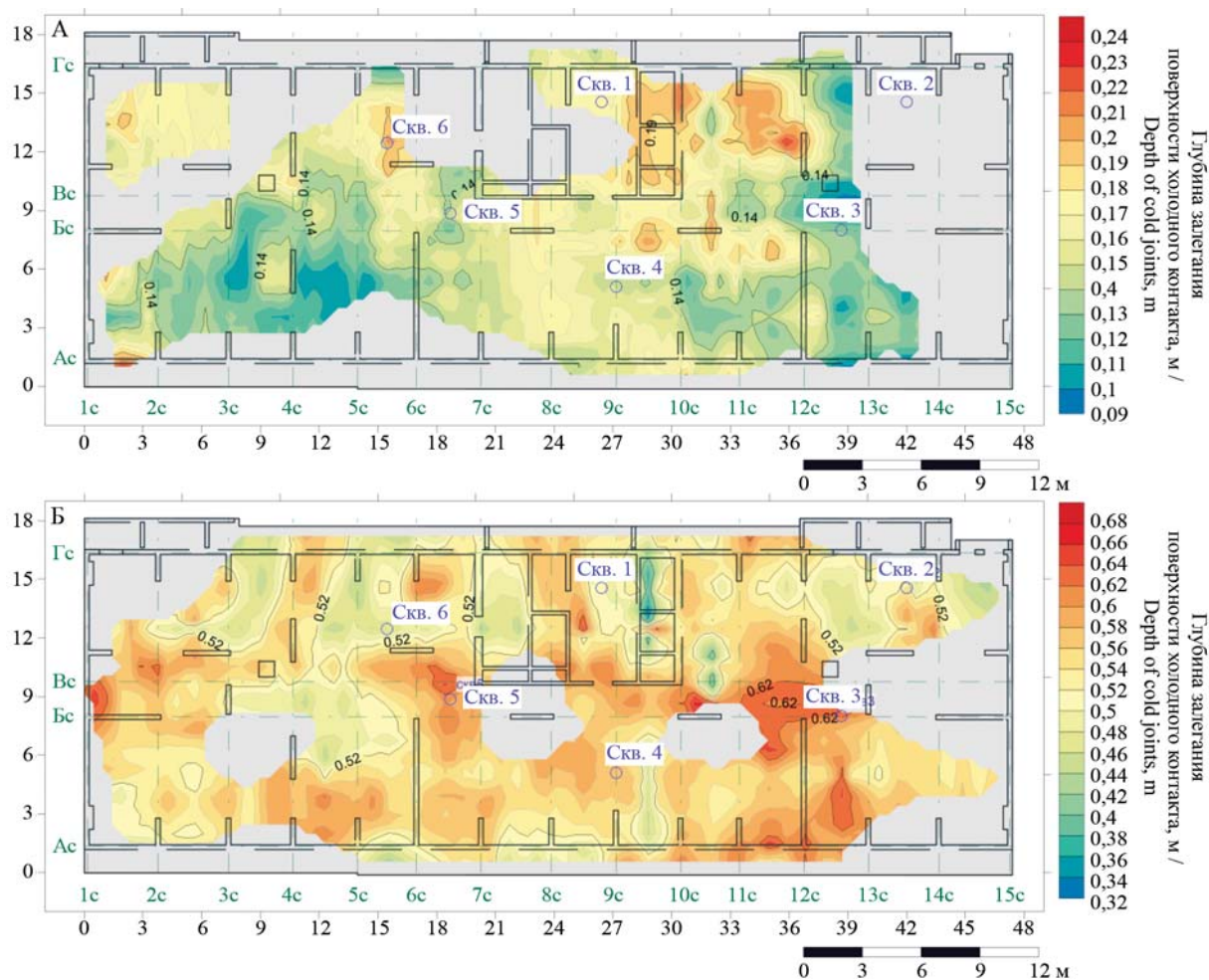


Рис. 3. Карты глубин залегания поверхностей первого (А) и второго (Б) холодных контактов (независимые цветовые шкалы)

Fig. 3. Depth charts of the first (A) and second (B) cold joints (independent color scales)

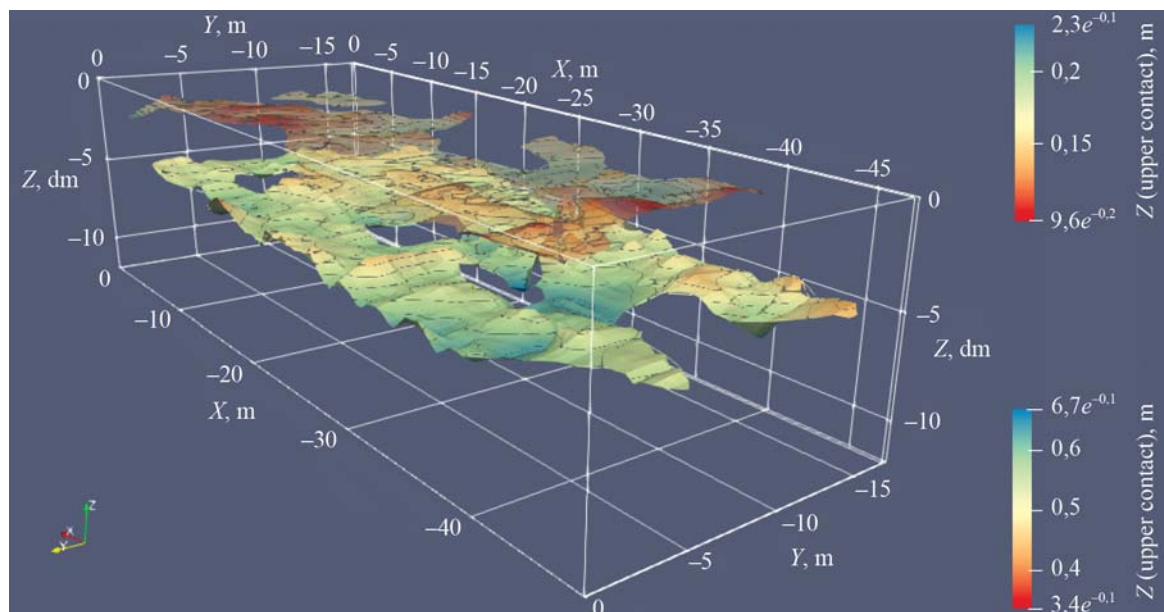


Рис. 4. Трехмерная визуализация результатов (граница образования холодных швов бетонирования)

Fig. 4. 3D visualization of results (cold joint boundary)

образцы разваливались на несколько частей. Стоит отметить, что отмеченные швы имеют не повсеместное распространение. Кроме того, в ходе изучения сколов кернов отмечено наличие воздушных полостей и следов некачественного уплотнения бетонной смеси.

Выполненное бурение позволило осуществить привязку отражающих границ. При анализе результатов бурения хорошо визуально заметны отличия в бетоне до глубины 15 см и глубже. Также заметно, что колонка развалилась на несколько частей. Изучение скола показало наличие воздушных полостей и сколов. По результатам анализа полученных данных установлено, что отражающие границы совпадают с границами разрушения керна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Метод георадиолокации дает возможность получить достоверную информацию о строении тела фундаментной плиты. По результатам георадиолокационного профилирования построены разрезы фундаментной плиты, внутри которой обнаружены границы, свидетельствующие о немонолитном строении плиты. Границы приурочены к зонам, содержащим воздушные полости и трещины.

С помощью георадиолокации можно определять дефекты бетонирования в теле конструкции — как каверны и полости, так и горизонтальные швы бетонирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капустин В.В., Ушаков А.Л., Бакайкин Д.В. Применение акустических методов для обследования строительных конструкций // Разведка и охрана недр. 2008. № 1. С. 25–28.
2. Блохин Д.И., Вознесенский А.С., Кудинов И.И., Набатов В.В., Шейнин В.И. Опыт использования геофизических методов для оценки фактических конструктивных параметров железобетонных фундаментных плит // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 2. С. 283–289.
3. Капустин В.В., Кувалдин А.В. Применение комплекса геофизических методов при исследовании фундаментных плит // Технологии сейсморазведки. 2015. № 1. С. 99–105. DOI: 10.18303/1813-4254-2015-1-99-105
4. Капустин В.В., Хмельницкий А.Ю., Бакайкин Д.В. О возможности использования неоднородных электромагнитных волн для исследования фундаментных конструкций // Вестник Московского университета. Серия 4: геология. 2011. № 4. С. 52–55.
5. Amran T.S.T., Ismail M.P., Ismail M.A., Amin M.S.M., Ahmad M.R., Basri N.S.M. GPR application on construction foundation study // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 271. P. 012089. DOI: 10.1088/1757-899X/271/1/012089
6. Barrile V., Pucinotti R. Application of radar technology to reinforced concrete structures: a case study // NDT & E International. 2005. Vol. 38. Issue 7. Pp. 596–604. DOI: 10.1016/j.ndteint.2005.02.003
7. Wendrich A., Trela C., Krause M., Maierhofer C., Effner U., Wöstmann J. Location of Voids in Masonry Structures by Using Radar and Ultrasonic Traveltime Tomography // ECNDT. 2006. Tu.3.2.5. 11 p.
8. Курлапов Д.В., Милютин Б.Г., Хабарков А.В. Техническое обследование фундаментных плит, армированных композитной арматурой // Строительство и техногенная безопасность. 2017. № 9 (61). С. 69–73.
9. Лапинов А.Е. Обследование и контроль качества конструкций, армированных и усиленных композитными полимерными материалами // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения : мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2018. С. 129–135.
10. Лапинов А.Е., Калашиников А.Ю. Обследование технического состояния фундаментной плиты, армированной стеклокомпозитной арматурой, с помощью георадара // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения : IX Междунар. науч.-практ. конф. 2018. С. 133–139.
11. Старовойтов А.В., Пятилова А.М., Шалаева Н.В., Калашиников А.Ю. Выделение пустот методом георадиолокации // Инженерные изыскания. 2013. № 13. С. 26–33.
12. Судакова М.С., Калашиников А.Ю., Терентьева Е.Б. Исследование возможностей георадарной томографии для поиска воздушных полостей в инженерных конструкциях // Дефектоскопия. 2016. № 9. С. 50–59.
13. Судакова М.С., Терентьева Е.Б., Калашиников А.Ю. Поиск и определение размеров конструктивных пустот с помощью георадарной томографии на примере двух колонн // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2017. Т. 13. № 1. С. 94–109.
14. Santos-Assunção S., Perez-Gracia V., Caselles O., Clapes J., Salinas V. Assessment of Complex Masonry Structures with GPR Compared to Other Non-Destructive Testing Studies // Remote Sensing. 2014. Vol. 6. Issue 9. Pp. 8220–8237. DOI: 10.3390/rs6098220
15. Hugenschmidt J. Concrete bridge inspection with a mobile GPR system // Construction and Building Materials. 2002. Vol. 16. Issue 3. Pp. 147–154. DOI: 10.1016/S0950-0618(02)00015-6

16. Фоменко Н.Е., Капустин В.В., Гапонов Д.А., Фоменко Л.Н. Использование комплекса инженерно-геофизических методов при изучении свайного поля // *Геотехника*. 2017. № 2. С. 56–64.

17. Hugenschmidt J., Loser R. Detection of chlorides and moisture in concrete structures with ground penetrating radar // *Materials and Structures*. 2008.

Vol. 41. Issue 4. Pp. 785–792. DOI: 10.1617/s11527-007-9282-5

18. Maierhofer C., Leipold S. Radar investigation of masonry structures // *NDT & E International*. 2001. Vol. 34. Issue 2. Pp. 139–147. DOI: 10.1016/S0963-8695(00)00038-4

Поступила в редакцию 4 декабря 2019 г.

Принята в доработанном виде 15 марта 2020 г.

Одобрена для публикации 26 июня 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Евгений Олегович Зеркаль — инженер лаборатории обследования зданий и сооружений; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5183-8013, Scopus: 56872925000, ORCID: 0000-0002-6821-414X; zerkal.eugene@gmail.com;

Алексей Юрьевич Калашников — техник лаборатории обследования зданий и сооружений; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, x_kalash@mail.ru;

Андрей Евгеньевич Лапшинов — старший преподаватель кафедры железобетонных и каменных конструкций, заведующий лабораторией обследования зданий и сооружений; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5961-7911, Scopus: 57204882288; la686@yandex.ru;

Алексей Иванович Тютюнкoв — инженер лаборатории обследования зданий и сооружений; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; alex-tut@mail.ru.

REFERENCES

1. Kapustin V.V., Ushakov A.L., Bakaikin D.V. Application of acoustic methods for inspection of building constructions. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2008; 1:25-28. (rus.).

2. Blokhin D.I., Voznesensky A.S., Kudinov I.I., Nabatov V.V., Sheinin V.I. The experience of using geophysical methods to assess the actual structural parameters of reinforced concrete foundation slabs. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2011; 2:283-289. (rus.).

3. Kapustin V.V., Kuvaldin A.V. Integrated geophysical approach for testing ground slabs. *Seismic Technology*. 2015; 1:99-105. DOI: 10.18303/1813-4254-2015-1-99-105 (rus.).

4. Kapustin V.V., Khmel'nitsky A.Yu., Bakaikin D.V. Revisited on possibility to apply electromagnetic waves for diagnostic of house footing constructions. *Moscow University Geology Bulletin*. 2011; 1:52-55. (rus.).

5. Amran T.S.T., Ismail M.P., Ismail M.A., Amin M.S.M., Ahmad M.R., Basri N.S.M. GPR application on construction foundation study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017; 271:012089. DOI: 10.1088/1757-899X/271/1/012089

6. Barrile V., Pucinotti R. Application of radar technology to reinforced concrete structures: a case

study. *NDT & E International*. 2005; 38(7):596-604. DOI: 10.1016/j.ndteint.2005.02.003

7. Wendrich A., Trela C., Krause M., Maierhofer C., Effner U., Wöstmann J. Location of Voids in Masonry Structures by Using Radar and Ultrasonic Traveltime Tomography. *ECNDT*. 2006; Tu.3.2.5:11.

8. Kurlapov D.V., Milutin B.G., Habarov A.V. Technical survey of foundation slabs reinforced with composite rebars. *Construction and Industrial Safety*. 2017; 9(61):69-73. (rus.).

9. Lapshinov A.E. Inspection and quality control of reinforced and strengthened structures with frp structures. *Inspection of buildings and structures: problems and solutions: materials of the VIII international scientific-practical conference*. St. Petersburg, 2018; 129-135. (rus.).

10. Lapshinov A.E., Kalashnikov A.Yu. The grp inspection of foundation slab reinforced with GFRP bars. *Inspection of buildings and structures: problems and solutions: IX international scientific-practical conference*. 2018; 133-139. (rus.).

11. Starovoytov A.V., Piatilova A.M., Shalaeva N.V., Kalashnikov A.Yu. Discrimination of hollow spaces by the ground penetrating radar method. *Engineering Survey*. 2013; 13:26-33. (rus.).

12. Sudakova M.S., Kalashnikov A.Y., Terent'eva E.B. Studying the possibilities of georadar

tomography in searching for air cavities in engineering constructions. *Defektoskopiya*. 2016; 9:50-59. (rus.).

13. Sudakova M.S., Terentieva E.B., Kalashnikov A.Y. Searching and measurement of functional voids by means of GPR tomography by the example of two columns. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017; 13(1):94-109. (rus.).

14. Santos-Assunção S., Perez-Gracia V., Cassetes O., Clapes J., Salinas V. Assessment of Complex Masonry Structures with GPR Compared to Other Non-Destructive Testing Studies. *Remote Sensing*. 2014; 6(9):8220-8237. DOI: 10.3390/rs6098220

15. Hugenschmidt J. Concrete bridge inspection with a mobile GPR system. *Construc-*

tion and Building Materials. 2002; 16(3):147-154. DOI: 10.1016/S0950-0618(02)00015-6

16. Fomenko N.E., Kapustin V.V., Gaponov D.A., Fomenko L.N. Using of engineering and geophysical methods complex during pile field survey. *Geotechnics*. 2017; 2:56-64. (rus.).

17. Hugenschmidt J., Loser R. Detection of chlorides and moisture in concrete structures with ground penetrating radar. *Materials and Structures*. 2008; 41(4):785-792. DOI: 10.1617/s11527-007-9282-5

18. Maierhofer C., Leipold S. Radar investigation of masonry structures. *NDT & E International*. 2001; 34(2):139-147. DOI: 10.1016/S0963-8695(00)00038-4

Received December 4, 2019

Adopted in a revised form on March 15, 2020

Approved for publication June 26, 2020

B I O N O T E S: **Evgeny O. Zerkal** — engineer of the building and construction inspection laboratory; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-код: 5183-8013, Scopus: 56872925000, ORCID: 0000-0002-6821-414X; zerkal.eugene@gmail.com;

Alexey Yu. Kalashnikov — technician of the building and construction inspection laboratory; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; x_kalash@mail.ru;

Andrey E. Lapshinov — senior lecturer of the Department of reinforced concrete and stone structures, head of the building and construction inspection laboratory; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-код: 5961-7911, Scopus: 57204882288; La686@yandex.ru;

Aleksey I. Tyutyunkov — engineer of the building and construction inspection laboratory; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; alex-tut@mail.ru.

Влияние контактных слоев на трещиностойкость изгибаемых трехслойных конструкций

Ву Динь Тхо¹, Е.А. Король²

¹ Университет транспортных технологий (УТТ); Тхань Суан, Ханой, Вьетнам;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В практике современного строительства применяются многослойные ограждающие конструкции, слои которых состоят из бетонов с различными физико-механическими характеристиками. При последовательной послойной укладке различных бетонов между ними образуются контактные слои, обладающие физико-механическими характеристиками, отличными от смежных с ними слоев. Прочностные и деформативные характеристики контактных слоев могут оказывать влияние на работу многослойной конструкции.

Материалы и методы. Для изучения напряженно-деформированного состояния (НДС) таких конструкций под воздействием нагрузок применяют, наряду с экспериментальными, численные методы. Исследования проведены на изгибаемых трехслойных конструктивных моделях с использованием в наружных слоях прочного конструкционного бетона, а в среднем слое — бетона низкой прочности. В процессе изготовления данных конструкций образуется контактный слой, геометрические, прочностные и деформативные характеристики которого моделируются в процессе проведения численных исследований.

Результаты. Установлено влияние геометрических, прочностных и деформативных характеристик контактных слоев на результаты расчета изгибаемых многослойных конструкций. Выполнено построение расчетных моделей и разработана методика расчета изгибаемых многослойных железобетонных конструкций с учетом влияния геометрических, прочностных и деформативных характеристик контактного слоя. По результатам проведенных численных расчетов различия момента при трещинообразовании трехслойных железобетонных балок могут достигать 4,3 % или больше. В практических расчетах, если толщина контактного слоя меньше 0,4 см, можно не учитывать влияние контактного слоя на результат расчета трехслойных железобетонных конструкций.

Выводы. Полученные результаты исследования позволяют определять рациональные параметры для проектирования многослойных ограждающих конструкций с железобетонными слоями различной прочности, связанными между собой монолитным контактным слоем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: многослойные конструкции, контактный слой, различный бетон, конструкционный бетон, легкий бетон, теплоизоляционный бетон, технология изготовления

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ву Динь Тхо, Король Е.А. Влияние контактных слоев на трещиностойкость изгибаемых трехслойных конструкций // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 7. С. 988–998. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.988-998

Influence of contact layers on cracking resistance of bending three-layer structures

Vu Dinh Tho¹, Elena A. Korol²

¹ University of Transport Technology (UTT), Thanh Xuân, Ha Noi, Viet Nam;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In the present-day construction practice, multilayer building envelopes are applied; their layers are made of concretes having different physical and mechanical characteristics. When different concretes are poured in successive layers, contact layers are formed; their physical and mechanical properties are unlike those of the adjacent layers. The strength and stress-strain characteristics of the contact layers can affect the behaviour of a multilayer structure.

Materials and methods. Numerical and experimental methods are applied to study the stress-strain state of such structures exposed to loading. Bending three-layer structural models, having external layers made of strong structural concrete and the middle layer made of low-strength concrete, were applied in the research project. A contact layer is formed in the process of their manufacturing; its geometrical, strength and stress-strain characteristics are simulated in the process of numerical studies.

Results. The co-authors have identified the effects produced by geometrical, strength and stress-strain characteristics of contact layers on the analysis of bending multilayer structures. Design models and a novel method of analysis have been developed for bending multilayer reinforced concrete structures with account taken of the influence of geometrical, strength and stress-strain characteristics of the contact layer. According to the results of numerical calculations, differences between cracking moments can reach 4.3 % or more for three-layer reinforced concrete beams. As for the practical calculations, if the thickness of the contact layer is below 0.4 cm, one can ignore the influence produced by the contact layer on the calculation result.

Conclusions. The results of the research help to identify the rational parameters for the design of multilayer enclosing structures having varying strength reinforced concrete layers interconnected by the monolithic contact layer.

KEYWORDS: multilayer structures, contact layer, various types of concrete, structural concrete, lightweight concrete, thermal insulating concrete, production technology

FOR CITATION: Vu Dinh Tho, Korol E.A. Influence of contact layers on cracking resistance of bending three-layer structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(7):988-998. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.988-998 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Для расчета многослойных железобетонных конструкций используются различные методы, выбор которых осуществляется с учетом особенностей конструирования и технологии изготовления [1–3].

Как было установлено проведенными исследованиями, на напряженно-деформированное состояние (НДС) многослойной конструкции влияют следующие факторы: физико-механические свойства используемых бетонов и геометрические параметры слоев [4–6]; геометрическая и физическая нелинейность; пластические и реологические свойства используемых материалов [7–8]; наличие трещин во внутреннем слое [9] и др.

Особое значение при построении расчетных моделей многослойных конструкций имеют способ формирования контактного слоя, который влияет на НДС конструкции, и особенности выбора или разработки методик исследования и расчета [1, 2, 10].

В результатах экспериментальных исследований [11, 12] определено влияние технологических параметров изготовления на формирование связи между различными слоями бетонов. При изготовлении многослойной конструкции между смежными слоями формируется контактная зона в виде пограничного слоя за счет проникновения плотного крупного и мелкого заполнителей конструкционного бетона в смежный слой бетона низкой прочности, и, наоборот, легкого заполнителя в — конструкционный слой. Это оказывает влияние на построение расчетной модели и разработку методики расчета многослойных конструкций.

Одной из перспективных областей применения многослойных конструкций являются ограждающие элементы гражданских зданий. Для создания ограждающих конструкций с высокими теплозащитными характеристиками используют легкие бетоны низкой теплопроводности [13–15]. В их числе — полистиролбетон, свойства которого всесторонне изучены и включены в нормативные документы [16–18]. Экспериментальными исследованиями доказана возможность формирования монолитной контактной зоны при изготовлении многослойных конструкций из конструкционных бетонов и полистиролбетона [19–21].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследований приняты следующие характеристики материалов: бетон класса В12,5–В30 для наружных слоев и внутреннего слоя из легкого бетона с низкими свойствами теплопроводности, с сопротивлением сжатию до 2 МПа [22].

В соответствии с проведенными ранее работами [1, 3, 22], расчетная схема распределения усилий и деформаций в трехслойном железобетонном сечении с монолитной связью слоев приведена на рис. 1.

В этом исследовании предполагается, что перед образованием трещин наибольшее относительное удлинение растянутого волокна бетона составляет $2R_{b,ext}/E_{ext}$.

На схеме А (рис. 1) предусмотрено, что толщины наружного h_1 и внутреннего h_2 слоев не изменяются. Они не зависят от контактных слоев кон-

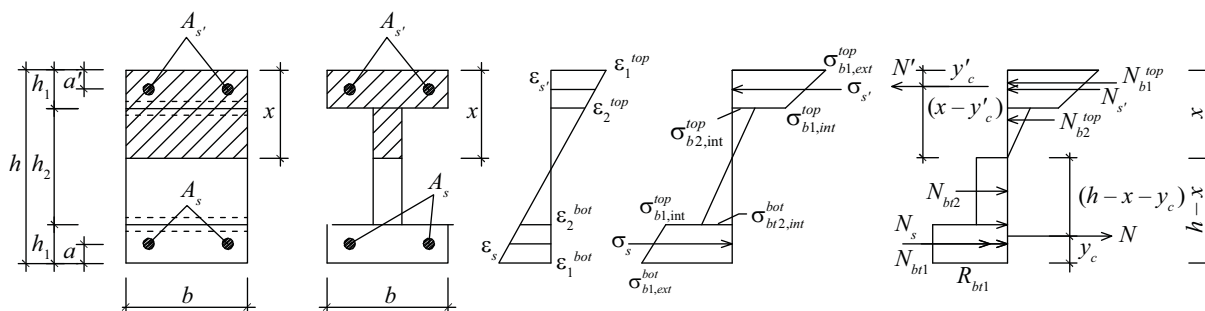


Рис. 1. Расчетная схема А распределения деформаций, напряжений и усилий в многослойном сечении при трещинообразовании

Fig. 1. Design Model A describing deformation, stress and force distribution over the multilayer cross section exposed to cracking

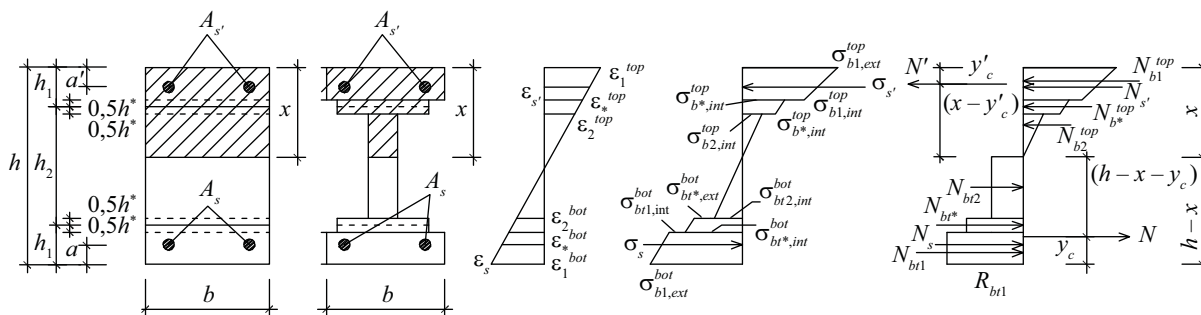


Рис. 2. Расчетная схема В распределения деформаций, напряжений и усилий в многослойном сечении при трещинообразовании

Fig. 2. Design Model B describing deformation, stress and force distribution over the multilayer cross section exposed to cracking

струкции, которые находятся в положении между различными слоями.

Для рассмотрения контактного слоя, образующегося смешиванием в процессе изготовления бетонов между наружным и внутренним слоями многослойной железобетонной конструкции, предложена схема расчета НДС с толщиной контактного слоя h^* (рис. 2).

На схеме В (рис. 2) контактный слой между наружным и внутренним слоями обладает свойствами и характеристиками материалов:

прочность на сжатие

$$R_{b*} (R_{b2} \leq R_{b*} \leq R_{b1}); \quad (1a)$$

прочность на растяжение

$$R_{bt*} (R_{bt2} \leq R_{bt*} \leq R_{bt1}) \quad (1b)$$

и модуль упругости

$$E_{b*} (E_{b2} \leq E_{b*} \leq E_{b1}); \quad (2)$$

толщина h^* ($0,5h^*$ относится к проникновению заполнителя бетона внутреннего слоя в высокопрочный бетонный слой наружного слоя и $0,5h^*$ относится к проникновению высокопрочного бетонного наружного слоя во внутренний слой из легкой бетонной смеси). Если значение $h^* = 0$ (исключая влияние контактного слоя), схема В вернется к схеме А.

Результаты предыдущих исследований [1, 2] показывают, что трещины не появляются в эксплуатационной стадии многослойных железобетонных конструкций, а растяжение в растянутой зоне не достигает предельного сопротивления растяжению.

Уравнения расчета деформации и напряжения в точках поперечного сечения показаны на схеме В (рис. 2) и имеют следующий вид:

$$\epsilon_1^{top} = \epsilon_0 \frac{x}{h-x}; \quad (3a)$$

$$\sigma_{b1}^{top} = \epsilon_1^{top} E_{b1} = \epsilon_0 \frac{x}{h-x} E_{b1} = 2R_{bt1} \frac{x}{h-x}; \quad (3b)$$

$$\epsilon_s' = \epsilon_0 \frac{x-a'}{h-x}; \quad (4a)$$

$$\sigma_s' = \epsilon_s' E_s + \sigma_{shr} = 2R_{bt1} \frac{E_s}{E_{b1}} \frac{x-a'}{h-x} + \sigma_{shr}; \quad (4b)$$

$$\epsilon_*^{top} = \epsilon_0 \frac{x - \left(h_1 - \frac{h^*}{2}\right)}{h-x}; \quad (5a)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{b*,ext}^{top} &= \epsilon_*^{top} E_{b1} = \epsilon_0 \frac{x - \left(h_1 - \frac{h^*}{2}\right)}{h-x} E_{b1} = \\ &= 2R_{bt1} \frac{x - \left(h_1 - \frac{h^*}{2}\right)}{h-x}; \end{aligned} \quad (5b)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{b*,int}^{top} &= \epsilon_b^{top} E_{b*} = \epsilon_0 \frac{x - \left(h_1 - \frac{h^*}{2}\right)}{h-x} E_{b*} = \\ &= 2R_{bt1} \frac{x - \left(h_1 - \frac{h^*}{2}\right)}{h-x} \frac{E_{b*}}{E_{b1}}; \end{aligned} \quad (5c)$$

$$\epsilon_2^{top} = \epsilon_0 \frac{x - \left(h_1 + \frac{h^*}{2}\right)}{h-x}; \quad (6a)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{b*,ext}^{top} &= \epsilon_2^{top} E_{b*} = \epsilon_0 \frac{x - \left(h_1 + \frac{h^*}{2}\right)}{h-x} E_{b*} = \\ &= 2R_{bt1} \frac{x - \left(h_1 + \frac{h^*}{2}\right)}{h-x} \frac{E_{b*}}{E_{b1}}; \end{aligned} \quad (6b)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{b2,int}^{top} &= \epsilon_2^{top} E_{b2} = \epsilon_0 \frac{x - \left(h_1 + \frac{h^*}{2}\right)}{h-x} E_{b2} = \\ &= 2R_{bt1} \frac{x - \left(h_1 + \frac{h^*}{2}\right)}{h-x} \frac{E_{b2}}{E_{b1}}; \end{aligned} \quad (6c)$$

$$\varepsilon_2^{bot} = \varepsilon_0 \frac{h - x - \left(h_1 + \frac{h^*}{2}\right)}{h - x}; \quad (7a)$$

$$\sigma_{bt2,int}^{bot} = R_{bt2}; \quad (7b)$$

$$\sigma_{bt*,ext}^{bot} = R_{bt*}; \quad (7c)$$

$$\varepsilon_*^{bot} = \varepsilon_0 \frac{x - \left(h_1 - \frac{h^*}{2}\right)}{h - x}; \quad (8a)$$

$$\sigma_{bt*,ext}^{bot} = R_{bt*}; \quad (8b)$$

$$\sigma_{bt1,int}^{bot} = R_{bt1}; \quad (8c)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_0 \frac{h - x - a}{h - x}; \quad (9a)$$

$$\sigma_s = \varepsilon_s E_s - \sigma_{shr} = 2R_{bt1} \frac{E_s}{E_{b1}} \frac{h - x - a}{h - x} - \sigma_{shr}; \quad (9b)$$

$$\varepsilon_1^{bot} = \varepsilon_0; \quad (10a)$$

$$\sigma_{bt1}^{bot} = R_{bt1}. \quad (10c)$$

Отсюда усилия, воспринимаемые бетоном и арматурой непосредственно перед образованием трещин, равны:

$$N_{b1}^{top} = \sigma_{b1,int}^{top} b \left(h_1 - \frac{h^*}{2}\right) + \frac{1}{2} (\sigma_{b1,ext}^{top} - \sigma_{b1,int}^{top}) b \left(h_1 - \frac{h^*}{2}\right); \quad (11)$$

$$N_{b*}^{top} = \sigma_{b*,int}^{top} b h^* + \frac{1}{2} (\sigma_{b*,ext}^{top} - \sigma_{b*,int}^{top}) b h^*; \quad (12)$$

$$N_{b2}^{top} = \frac{1}{2} \sigma_{b2,int}^{top} \left(x - h_1 - \frac{h^*}{2}\right) b; \quad (13)$$

$$N_s' = (\varepsilon_s' E_s + \sigma_{shr}) A_s'; \quad (14)$$

$$N_{bt1}^{bot} = R_{bt1} b \left(h_1 - \frac{h^*}{2}\right); \quad (15)$$

$$N_{bt*}^{bot} = R_{bt*} b h^*; \quad (16)$$

$$N_{bt2}^{bot} = R_{bt2} b \left(x - h_1 - \frac{h^*}{2}\right); \quad (17)$$

$$N_s = (\varepsilon_s E_s - \sigma_{shr}) A_s. \quad (18)$$

Суммарное сжатие в сечении составляет:

$$N^{top} = N_{b1}^{top} + N_{b*}^{top} + N_{b2}^{top} + N_s'.$$

Суммарное растяжение в сечении составляет:

$$N^{bot} = N_{bt1}^{bot} + N_{bt*}^{bot} + N_{bt2}^{bot} + N_s.$$

Высота сжатой зоны перед образованием трещин определена из условия равновесия внешних сил и внутренних усилий в арматуре и бетоне: $N^{top} = N^{bot}$.

$$\Leftrightarrow \frac{1}{2} \left(\frac{E_{b2}}{E_{b1}} - \frac{R_{bt2}}{R_{bt1}} \right) x^2 + \left[\frac{3}{2} \left(h_1 - \frac{h^*}{2} \right) + \left(\frac{E_{b'}}{E_{b1}} + \frac{R_{bt'}}{2R_{bt1}} \right) h^* - \left(h_1 + \frac{h^*}{2} \right) \left(\frac{E_{b2}}{E_{b1}} + \frac{R_{bt2}}{2R_{bt1}} \right) + \frac{R_{bt2}}{R_{bt1}} h + \frac{E_s}{E_{b1}} \frac{(A_s' + A_s)}{b} - \frac{\sigma_{shr}}{2R_{bt1}b} (A_s' + A_s) \right] x + \left[-\frac{1}{2} \left(h_1 - \frac{h^*}{2} \right)^2 - \frac{E_{b*}}{E_{b1}} h^* h_1 + \frac{1}{2} \frac{E_{b2}}{E_{b1}} \left(h_1 + \frac{h^*}{2} \right)^2 - \frac{1}{2} h \left(h_1 - \frac{h^*}{2} \right) - \frac{1}{2} \frac{R_{bt*}}{R_{bt1}} h h^* - \frac{1}{2} \frac{R_{bt2}}{R_{bt1}} h \left(h - h_1 - \frac{h^*}{2} \right) - \frac{E_s'}{E_{b1}} \frac{A_s' a'}{b} - \frac{E_s}{E_{b1}} \frac{A_s (h - a)}{b} - \frac{\sigma_{shr}}{2R_{bt1}b} \frac{A_s' a'}{b} - \frac{\sigma_{shr}}{2R_{bt1}b} \frac{A_s (h - a)}{b} \right] = 0. \quad (19)$$

Уравнение (19) относительно x квадратное, после его решения возможно получить высоту сжатой зоны до нулевой линии.

Момент трещинообразования $M_{cr,1}$ изгибаемых трехслойных структур, выполненных из различных бетонов, состоит из изгибающих моментов, воспринимаемых слоями растяжений зоны растяжения, включая арматурную сталь:

$$M_{crc} \leq \left(\sum M_{b,i} + M_s \right) + \left(\sum M_{bt,i} + M_s \right). \quad (20)$$

Эти моменты могут быть рассчитаны в соответствии с результирующими осевыми силами, действующими в слоях бетона и арматурной стали, и их положениями:

$$M_{crc} \leq N(h - y_c' - y_c). \quad (21)$$

Определим положение равнодействующих усилий сжатой и растянутой зон и плечо внутренней пары сил:

$$\begin{aligned}
 & \sigma_{b1,int}^{top} b \left(h_1 - \frac{h^*}{2} \right) \frac{\left(h_1 - \frac{h^*}{2} \right)}{2} + \\
 & + \frac{1}{2} \left(\sigma_{b1,ext}^{top} - \sigma_{b1,int}^{top} \right) b \left(h_1 - \frac{h^*}{2} \right) \frac{\left(h_1 - \frac{h^*}{2} \right)}{3} + \\
 & + \sigma_{b^*,int}^{top} b h^* \left(h_1 \right) + \frac{1}{2} \left(\sigma_{b^*,ext}^{top} - \sigma_{b^*,int}^{top} \right) \times \\
 & \times b h^* \left(h_1 - \frac{h^*}{2} + \frac{1}{3} h^* \right) + \frac{1}{2} \sigma_{b2,int}^{top} \left(x - h_1 - \frac{1}{2} h^* \right) \times \\
 & \times b \left[\left(h_1 - \frac{h^*}{2} \right) + h^* + \frac{1}{3} \left(x - h_1 - \frac{h^*}{2} \right) \right] + \\
 & y'_c = \frac{+ \left(\sigma'_s + \sigma_{shr} \right) A_{s1} a'}{\sigma_{b1,int}^{top} \left(h_1 - \frac{h^*}{2} \right) b + \frac{1}{2} \left(\sigma_{b1,ext}^{top} - \sigma_{b1,int}^{top} \right) \times} ; (22) \\
 & \times \left(h_1 - \frac{h^*}{2} \right) b + \sigma_{b^*,int}^{top} b h^* + \frac{1}{2} \left(\sigma_{b^*,ext}^{top} - \sigma_{b^*,int}^{top} \right) \times \\
 & \times b \left(h^* \right) + \frac{1}{2} \sigma_{b2,int}^{top} \left(x - h_1 - \frac{1}{2} h^* \right) b + \\
 & + \left(\sigma'_s + \sigma_{shr} \right) A_{s1} \\
 & R_{b1} b \left(h_1 - \frac{h^*}{2} \right) \frac{\left(h_1 - \frac{h^*}{2} \right)}{2} + R_{b1^*} b h^* \left(h_1 \right) + \\
 & + R_{b2} b \left(h - x - h_1 + \frac{h^*}{2} \right) \times \\
 & \times \left[h_1 - \frac{h^*}{2} + h^* + \frac{h - x - \left(h_1 - \frac{h^*}{2} \right)}{3} \right] + \\
 & y_c = \frac{+ \left(\sigma'_s - \sigma_{shr} \right) A_s a}{R_{b1} b \left(h_1 - \frac{h^*}{2} \right) + R_{b1^*} b h^* +} \cdot (23) \\
 & + R_{b2} b \left(h - x - h_1 + \frac{h^*}{2} \right) \times \\
 & \times b + \left(\sigma'_s - \sigma_{shr} \right) A_s
 \end{aligned}$$

Прогиб трехслойных элементов от изгиба соответствует изгибу балки, а отклонение от смещения сопровождается смещением наполнителя. В этом случае происходит отклонение поперечного сечения с дополнительной кривизной наружных слоев.

Прогиб от изгиба в середине пролета образцов балки до образования трещины рассчитывается по формуле:

$$f_M = \frac{M}{\varphi_{b1} E_b J_{red}} \rho_m l^2. \quad (24)$$

Прогиб от поперечных сил в любом сечении балки элемента с координатой x определяется по формуле:

$$f_Q = \int \frac{kQ(x)}{GF} dx + C_Q, \quad (25)$$

где C_Q — постоянная интегрирования, равная нулю при шарнирном опирании балки; G — модуль сдвига материала среднего слоя; k — коэффициент, учитывающий форму и размеры поперечного сечения, определяется по формуле:

$$k = \frac{F}{J^2} \int \frac{S^2(z)}{b(z)} dz, \quad (26)$$

где F и J — площадь и момент инерции приведенного сечения; S и b — статический момент отсеченной части сечения и ширина сечения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты анализа НДС многослойных железобетонных конструкций между предлагаемой схемой (рис. 2) и схемой (рис. 1) по стандарту СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции»¹ были выполнены авторами на образце Б-1 трехслойной железобетонной балки шириной $b = 200$ мм, высотой $h = 250$ мм и длиной $l = 3000$ мм, с параметрами, показанными в табл. 1 и на рис. 3.

Экспериментальная балка Б-1 имеет параметры:

- наружный слой (В20): высотой $h_1 = 5$ см; $R_{b1} = 15$ МПа; $R_{bt1} = 1,4$ МПа; $E_{b1} = 27\,000$ МПа;
- внутренний слой (В0,75): высотой $h_2 = 15$ см; $R_{b2} = 1,02$ МПа; $R_{bt2} = 0,34$ МПа; $E_{b2} = 7000$ МПа.

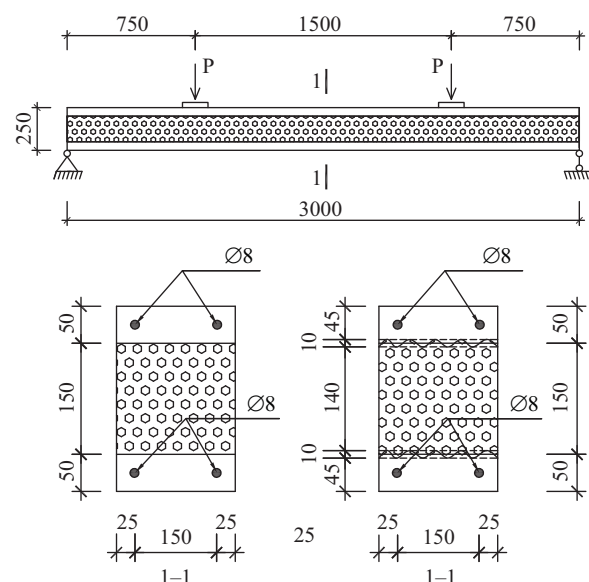


Рис. 3. Параметры и размер экспериментальной балки Б-1
Fig. 3. Parameters and dimensions of B-1 experimental beam

¹ СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. М. : Стандарты, 2018, 143 с.

Арматура принята диаметром 8 мм (А-III); $\sigma_y = 475,2$ МПа; $\sigma_u = 660,5$ МПа; модуль упругости арматуры $E_s = 206\,000$ МПа.

В положении между внутренним и наружным слоями происходит проникновение разных типов бетона. Один слой (контактный слой) формируется из смешанного материала.

Контактный слой высотой h^* варьируется в пределах от 0 до 1 см; прочность бетона на сжатие R_{b^*}

варьируется от R_{b2} до R_{b1} ; прочность бетона на растяжение R_{bt^*} — от R_{bt2} до R_{bt1} ; начальный модуль упругости E_{b^*} — от E_{b2} до E_{b1} .

Значения момента при трещинообразовании M_{crc} балок приведены в табл. 2, 3 и на рис. 4, 5.

Результаты исследований показали, что толщина и прочность контактного слоя бетона влияют на НДС трехслойной железобетонной конструкции. При одинаковом значении прочности бетона R_{b^*}

Табл. 1. Параметры элементов и характеристики бетона слоев конструкции

Table 1. Parameters of elements and characteristics of the concrete of structural layers

Структура слоев / Structure of layers	Наружный верхний (1) В20 / Outer top (1) B20	Контактный слой В* / Contact layer B*	Внутренний (2) В0.75 / Inner (2) B0.75	Контактный слой В* / Contact layer B*	Наружный нижний (1) В20 / Outer bottom (1) B20
Толщина слоев, м / Layer thickness, m	0,05	h^* от 0 до 0,1 / h^* from 0 to 0.1	0,15	h^*	0,05
Прочность бетона на сжатие R_b , МПа / Compressive strength of concrete R_b , MPa	$R_{b1} = 15$	R_{b^*} от R_{b2} до R_{b1} / from R_{b2} to R_{b1}	$R_{b2} = 1,02$	R_{b^*}	$R_{b1} = 15$
Прочность бетона на рас- тяжение R_{bt} , МПа / Tensile strength of concrete R_{bt} , MPa	$R_{bt1} = 1,4$	R_{bt^*} от R_{bt2} до R_{bt1} / from R_{bt2} to R_{bt1}	$R_{bt2} = 0,34$	R_{bt^*}	$R_{bt1} = 1,4$
Начальный модуль упру- гости E_b , МПа / Initial modulus of elasticity E_b , MPa	$E_{b1} = 27,000$	E_{b^*} от E_{b2} до E_{b1} / from E_{b2} to E_{b1}	$E_{b2} = 7000$	E_{b^*}	$E_{b1} = 24\,000$
Коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$ / Poisson's ratio $\nu = 0.2$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Модуль сдвига $G = E_0/(2(1 + \nu))$, МПа / Shear modulus $G = E_0/(2(1 + \nu))$, MPa	11 250	G^* от G_2 до G_1 / from G_2 to G_1	2916.67	G_*	11 250
Средняя плотность бетона, кг/м ³ / Average concrete density, kg/m ³	2400	—	350	γ_*	2400

Табл. 2. Момент трещинообразования балок M_{crc} при изменении толщины и прочности контактных слоев при расчете по схемам В и А

Table 2. Beam cracking moment M_{crc} in case of changes in the thickness and strength of contact layers if the analysis is performed pursuant to diagrams B and A

h^*	Момент трещинообразования при прочности бетона, $M_{crc} \cdot 10^{-4}$, кг·см / Cracking in case of concrete strength, $M_{crc} \cdot 10^{-4}$, kg/cm							
	10,2 МПа / MPa	30 МПа / MPa	50 МПа / MPa	70 МПа / MPa	90 МПа / MPa	110 МПа / MPa	130 МПа / MPa	150 МПа / MPa
0	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79
0,2	3,76	3,77	3,78	3,79	3,80	3,80	3,81	3,82
0,4	3,73	3,75	3,76	3,78	3,80	3,82	3,84	3,85
0,6	3,70	3,72	3,75	3,78	3,80	3,83	3,86	3,88
0,8	3,66	3,70	3,73	3,77	3,81	3,84	3,88	3,91
1	3,63	3,68	3,72	3,76	3,81	3,85	3,90	3,94

Табл. 3. Различия между моментами трещинообразования при расчете по схемам В и А

Table 3. Discrepancies between cracking moments for B and A calculation patterns

h^*	Различия между моментами трещинообразования при расчете по схемам В и А / Discrepancies between cracking moments for B and A calculation patterns							
	10,2 МПа / MPa	30 МПа / MPa	50 МПа / MPa	70 МПа / MPa	90 МПа / MPa	110 МПа / MPa	130 МПа / MPa	150 МПа / MPa
0	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
0,2	– 0,83 %	– 0,59 %	– 0,36 %	– 0,12 %	0,11 %	0,35 %	0,58 %	0,82 %
0,4	– 1,67 %	– 1,20 %	– 0,73 %	– 0,26 %	0,21 %	0,68 %	1,15 %	1,62 %
0,6	– 2,52 %	– 1,81 %	– 1,11 %	– 0,40 %	0,30 %	1,01 %	1,71 %	2,41 %
0,8	– 3,38 %	– 2,44 %	– 1,50 %	– 0,56 %	0,38 %	1,32 %	2,26 %	3,20 %
1	– 4,25 %	– 3,08 %	– 1,90 %	– 0,73 %	0,45 %	1,62 %	2,80 %	3,97 %

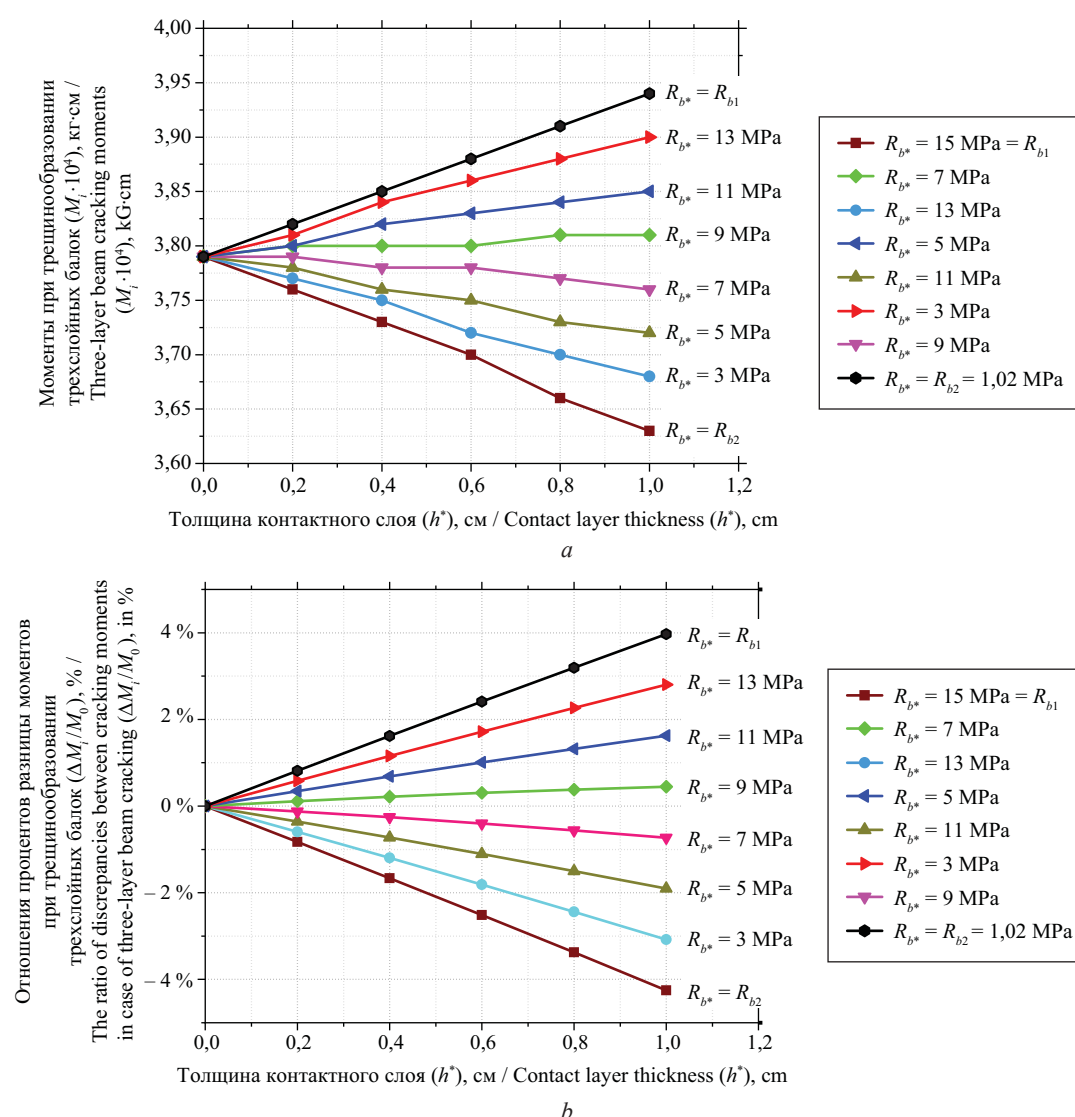


Рис. 4. Моменты и различия между моментами трещинообразования балок M_{cr} при изменении толщины и прочности контактных слоев: а — момент трещинообразования балок M_{cr} при изменении толщины и прочности контактных слоев; б — различия между моментами трещинообразования при расчете по схемам В и А

Fig. 4. Moments and discrepancies between beam cracking moments M_{cr} in case of changes in the thickness and strength of contact layers: а — beam cracking moment M_{cr} if the thickness and strength of contact layers change; б — discrepancies between cracking moments for B and A calculation patterns

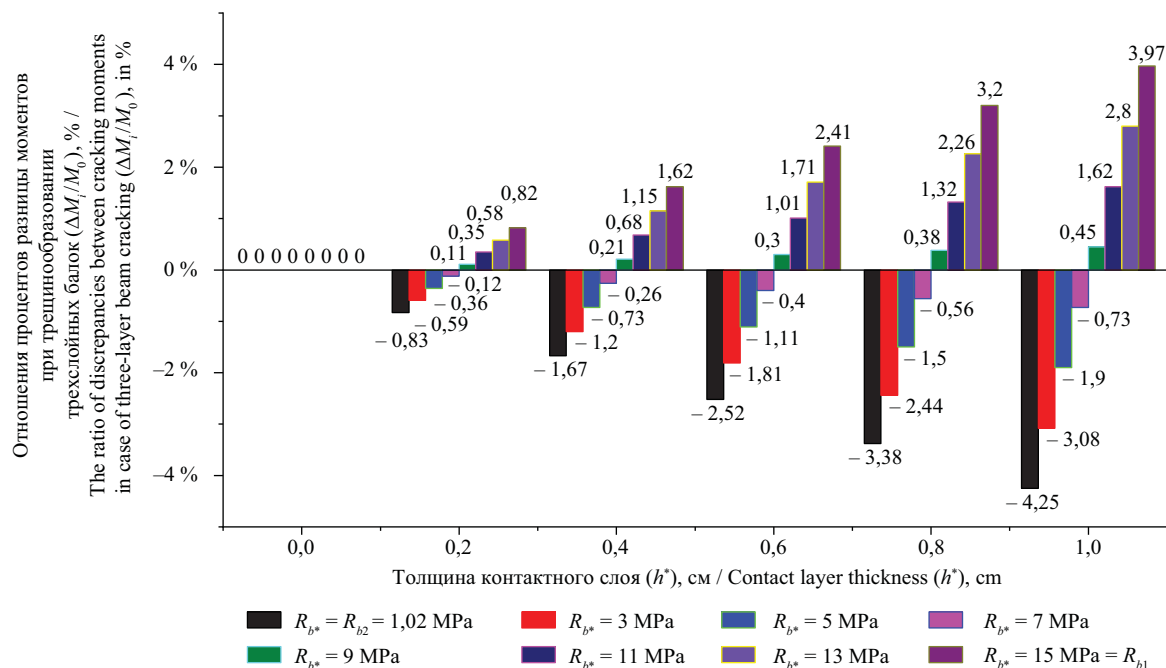


Рис. 5. Проценты перепада момента при образовании трещин при расчете между схемой В и схемой А

Fig. 5. Moment drop in case of cracking for the calculation performed pursuant to Calculation Pattern B and Calculation Pattern A

контактного слоя, толщина контактного слоя h^* увеличивается от 0 до 1 см, момент при трещинообразовании балки уменьшается. Изменение момента при трещинообразовании имеет разницу от $-4,25$ до $3,97$ % по сравнению со значением момента при отсутствии влияния контактного слоя. В случае, когда толщина $h^* = 1$ см, моменты трещинообразования отличаются значительно.

Если толщина h^* получает значение от 0 до 0,4 см, момент трещинообразования балки незначительно различается при изменении прочности контактного слоя (различия меньше 2 %). Если толщина h^* больше 0,6 см, момент трещинообразования балки значительно меняется.

Прочность контактного слоя между прочностями внешнего слоя из обычного бетона R_{b1} и среднего слоя из легкого бетона R_{b2} оказывает влияние на величину момента при трещинообразовании трехслойных балок. Результаты исследований (табл. 3 и рис. 5) показывают, что, когда толщина контактного слоя принимает постоянные значения в диапазоне от 0 до 1 см, происходит увеличение прочности контактного слоя и момента при трещинообразовании многослойной железобетонной балки.

Когда прочность R_{b^*} получает значение R_{b1} , момент трещинообразования достигнет максимального значения. Момент трещинообразования достигнет минимального значения при прочности $R_{b^*} = R_{b2}$.

В случае $R^* = 0,5(R_{b1} + R_{b2})$, момент трещинообразования балки значительно изменяется при изменении толщины контактного слоя от 0 до 1 см (различия меньше 1 %), т.е., когда $R^* = 0,5(R_{b1} + R_{b2})$, момент трещинообразования при расчете НДС трехслойной железобетонной балки по схеме А и В не сильно отличается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе изготовления железобетонной конструкции из бетонов различных прочностей образуется контактный слой между внешним и внутренним слоями. Этот слой обладает свойством промежуточной прочности между прочностями бетонов внешнего и внутреннего слоев. Толщина контактного слоя зависит от технологических параметров, изготовления, фракционного состава, используемых для изготовления балки.

Геометрические и физические характеристики прочности контактного слоя влияют на НДС трехслойных железобетонных балок под нагрузкой. По результатам проведенных расчетов, различие момента при трещинообразовании трехслойных железобетонных балок может достигать 4,3 % или более.

В практических расчетах, если толщина контактного слоя меньше 0,4 см, можно не учитывать влияние контактного слоя на результат расчета трехслойных железобетонных конструкций.

В ряде работ предлагается учитывать контактный слой. Однако по результатам экспериментальных исследований без учета контактного слоя не выявлены существенные отклонения расчетных и экспериментальных результатов.

Тем не менее численные исследования показали, что точность расчета может быть увеличена за счет видения в расчетной модели геометрических и физических параметров контактного слоя

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В.И., Турусов Р.А., Цыбин Н.Ю. Определение напряженно-деформированного состояния трехслойной балки с применением метода контактного слоя // Вестник МГСУ. 2016. № 4. С. 17–26.
2. Andreev V.I., Turusov R.A., Tsybin N.Yu. Application of the Contact Layer in the Solution of the Problem of Bending the Multilayer Beam // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 59–65. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.080
3. Колчунов В.И., Сапожников П.В. Модель сопротивления пограничного слоя между разными бетонами и методика численных и экспериментальных исследований // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и конструкции : мат. III Всеросс. конф. Чебоксары, 2001. С. 245–250.
4. Gara F., Ragni L., Roia D., Dezi L. Experimental behaviour and numerical analysis of floor sandwich panels // Engineering Structures. 2012. Vol. 36. Pp. 258–269. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.12.011
5. Vu Dinh Tho, Korol E.A. Influence of Geometrical Parameters of the Cross Section, Strength and Deformability of the Materials Used on Stress-strain State of Three-layered Reinforced Concrete // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 661. P. 012121. DOI:10.1088/1757-899X/661/1/012121
6. Benayoune A., Samad A.A.A., Trikha D.N., Ali A.A.A., Ellinna S.H.M. Flexural behaviour of precast concrete sandwich composite panel — Experimental and theoretical investigations // Construction and Building Materials. 2008. Vol. 22. Issue 4. Pp. 580–592. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.11.023
7. Gara F., Ragni L., Roia D., Dezi L. Experimental tests and numerical modelling of wall sandwich panels // Engineering Structures. 2012. Vol. 37. Pp. 193–204. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.12.027
8. Yue Z., Xiao H. Generalized Kelvin Solution based boundary element method for crack problems in multilayered solids // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2002. Vol. 26. Issue 8. Pp. 691–705. DOI: 10.1016/s0955-7997(02)00038-3
9. Marčiukaitis G., Juknevičius L. Influence of The Internal Layer Cracks on the Cracking of Flexural Three-Layer Concrete Members // Journal of Civil Engineering and Management. 2002. Vol. 8. Issue 3. Pp. 153–158. DOI: 10.1080/13923730.2002.10531270
10. Andreev V.I., Turusov R.A., Tsybin N.Yu. The contact layer method in calculating of the shear compounds // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 117. P. 00008. DOI: 10.1051/matecconf/201711700008
11. Король Е.А., Пугач Е.М., Харькин Ю.А. Влияние технологических факторов на формирование связи слоев многослойной ограждающей конструкции // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 67–75.
12. Lander V., Shauman Z. Microstructure research of contact zone aggregate hardened cement binder in filtering concretes // The 111 International Symposium on Silicate Chemistry. Brno, 2005.
13. Sayadi A.A., Tapia J.V., Neitzert T.R., Clifton G. C. Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 112. Pp. 716–724. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.218
14. Lam T.V., Vu D.T., Dien V.K., Bulgakov B.I., Korol E.A. Properties and thermal insulation performance of light-weight concrete // Magazine of Civil Engineering. 2018. Vol. 84 (8). Pp. 173–191. DOI: 10.18720/MCE.84.17
15. Xu Y., Jiang L., Xu J., Chu H., Li Y. Prediction of compressive strength and elastic modulus of expanded polystyrene lightweight concrete // Magazine of Concrete Research. 2015. Vol. 67. Issue 17. Pp. 954–962. DOI: 10.1680/mac.14.00375
16. Chen B., Liu N. A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 44. Pp. 691–698. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.091
17. Могушков П.Т., Бойков И.В., Скориков Р.Е. Применение полистиролбетона в строительстве // Развитие технических наук в современном мире : сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж. 2015. № 2. С. 135–138.
18. Wu Z., Chen B., Liu N. Fabrication and compressive properties of expanded polystyrene foamed concrete: Experimental research and modeling // Journal of Shanghai Jiaotong University (Science). 2013. Vol. 18. Issue 1. Pp. 61–69. DOI: 10.1007/s12204-013-1369-2
19. Пшеничный Г.Н. К вопросу о контактной зоне бетона и железобетона // Бетон и железобетон. 2006. № 2. С. 7–9.

20. Колчунов В.И., Сапожников П.В. Деформативность и трещиностойкость контактной зоны многослойных бетонных и железобетонных конструкций // *Строительство, транспорт*. 2004. № 2. С. 13–18.

21. Tsybin N., Turusov R., Andreev V., Kolesnikov A. Stress-strain state of a three-layer rod. Comparison of the results of analytical and numerical calculations with the experiment // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 196. P. 01057. DOI: 10.1051/matec-conf/201819601057

22. Korol E., Tho V.D., Hoang N.H. Analysis the effects of lightweight concrete in the middle layer of multi-layered reinforced concrete structures on the stress-strain state using the finite element method // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 196. P. 02022. DOI: 10.1051/matecconf/201819602022

Поступила в редакцию 16 мая 2020 г.

Принята в доработанном виде 6 июня 2020 г.

Одобрена для публикации 26 июня 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ву Динь Тхо** — старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства; **Университет транспортных технологий (УТТ)**; 120500, Ханой, 54-Чиеу Хук, Тхань Суан, Вьетнам; vuthoks@gmail.com;

Елена Анатольевна Король — доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; korolea@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Andreev V.I., Turusov R.A., Tsybin N.Yu. Determination of stress-strain state of a three-layer beam with application of contact layer method. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016; 4:17-26. (rus.).

2. Andreev V.I., Turusov R.A., Tsybin N.Yu. Application of the Contact Layer in the Solution of the Problem of Bending the Multilayer Beam. *Procedia Engineering*. 2016; 153:59-65. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.080

3. Kolchunov V.I., Sapozhnikov P.V. The model of resistance of the boundary layer between different concretes and the method of numerical and experimental studies. *New in architecture, design of building structures and structures: mat. III All-Russian Conference*. Cheboksary. 2001; 245-250. (rus.).

4. Gara F., Ragni L., Roia D., Dezi L. Experimental behaviour and numerical analysis of floor sandwich panels. *Engineering Structures*. 2012; 36:258-269. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.12.011

5. Vu Dinh Tho, Korol E.A. Influence of Geometrical Parameters of the Cross Section, Strength and Deformability of the Materials Used on Stress-strain State of Three-layered Reinforced Concrete. *IOP Conference Series: materials Science and Engineering*. 2019; 661:012121. DOI:10.1088/1757-899X/661/1/012121

6. Benayoune A., Samad A.A.A., Trikh D.N., Ali A.A.A., Ellinna S.H.M. Flexural behaviour of pre-cast concrete sandwich composite panel — Experimental and theoretical investigations. *Construction and Building Materials*. 2008; 22(4):580-592. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.11.023

7. Gara F., Ragni L., Roia D., Dezi L. Experimental tests and numerical modelling of wall sandwich panels. *Engineering Structures*. 2012; 37:193-204. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.12.027

8. Yue Z., Xiao H. Generalized Kelvin Solution based boundary element method for crack problems in multilayered solids. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2002; 26(8):691-705. DOI: 10.1016/s0955-7997(02)00038-3

9. Marčiukaitis G., Juknevičius L. Influence of The Internal Layer Cracks on the Cracking of Flexural Three-Layer Concrete Members. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2002; 8(3):153-158. DOI: 10.1080/13923730.2002.10531270

10. Andreev V.I., Turusov R.A., Tsybin N.Yu. The contact layer method in calculating of the shear compounds. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00008. DOI: 10.1051/matecconf/201711700008

11. Korol' E.A., Pugach E.M., Kharkin Yu.A. The influence of manufacturing factors on the formation of layer connections in multilayer exterior walls. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 3:67-75. (rus.).

12. Lander V., Shauman Z. Microstructure research of contact zone aggregate hardened cement binder in filtering concretes. *The 111 International Symposium on Silicate Chemistry*. Brno, 2005.

13. Sayadi A.A., Tapia J.V., Neitzert T.R., Clifton G. C. Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. *Construction and Building Materials*. 2016; 112:716-724. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.218

14. Lam T.V., Vu D.T., Dien V.K., Bulgakov B.I., Korol E.A. Properties and thermal insulation performance of light-weight concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 84(8):173-191. DOI: 10.18720/MCE.84.17
15. Xu Y., Jiang L., Xu J., Chu H., Li Y. Prediction of compressive strength and elastic modulus of expanded polystyrene lightweight concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2015; 67(17):954-962. DOI: 10.1680/mac.14.00375
16. Chen B., Liu N. A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 2013; 44:691-698. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.091
17. Mogushkov R.T., Boykov I.V., Skorikov R.E. The use of polystyrene concrete in construction. *Development of technical sciences in the modern world: Scientific-practical conf. Voronezh*, 2015; 2:135-138. (rus.).
18. Wu Z., Chen B., Liu N. Fabrication and compressive properties of expanded polystyrene foamed concrete: Experimental research and modeling. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*. 2013; 18(1):61-69. DOI: 10.1007/s12204-013-1369-2
19. Pshenichny G.N. To the question of the contact zone of concrete and reinforced concrete. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2006; 2:7-9. (rus.).
20. Kolchunov V.I., Shoemakers P.V. Deformability and crack resistance of the contact zone of multilayer concrete and reinforced concrete structures. *Construction transport*. 2004; 2:13-18. (rus.).
21. Tsybin N., Turusov R., Andreev V., Kolesnikov A. Stress-strain state of a three-layer rod. Comparison of the results of analytical and numerical calculations with the experiment. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 196:01057. DOI: 10.1051/mateconf/201819601057
22. Korol E., Tho V.D., Hoang N.H. Analysis the effects of lightweight concrete in the middle layer of multi-layered reinforced concrete structures on the stress-strain state using the finite element method. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 196:02022. DOI: 10.1051/mateconf/201819602022

Received May 16, 2019

Adopted in a revised form on June 6, 2020.

Approved for publication June 26, 2020

BIONOTES: **Vu Dinh Tho** — senior lecturer of Department of Industrial and Civil Engineering; **University of transport technology (UTT)**; 54-Trieu Khuc, Thanh Xuan, Ha Noi, 120500, Vietnam, vuthoks@gmail.com;

Elena A. Korol — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of housing and municipal complex; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian, korolea@mgsu.ru.

Свойства цементных композитов на основе известняка в зависимости от его гранулометрического состава

С.В. Самченко, О.В. Александрова, А.Ю. Гуркин

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Использование известняка в качестве дополнительного цементирующего материала в цементных композициях позволяет решать как вопросы экологии, так и экономические вопросы снижения затрат на строительство. В этой связи все более актуальным становится изучение свойств цементных композитов на основе известняка в зависимости от его гранулометрического состава и объемного содержания. Цель исследования — оптимизация свойств композиционных материалов на основе портландцемента и известняка посредством изменения гранулометрического состава молотого известняка.

Материалы и методы. Использовали известняк с тремя различными удельными поверхностями по Блейну: 250, 300 и 450 м²/кг, с их содержанием 10, 15, 25 и 35 %. Испытания проводили на цементно-песчаных растворах. Определяли влияние гранулометрического состава известняка на удобоукладываемость и прочность композиционного цемента на сжатие.

Результаты. Влияние известняка на предельное напряжение сдвига становится более выраженным, когда возрастает количество известняка до 25 и 35 %. Наиболее это ощутимо для известняка с высоким содержанием тонких фракций 5–20 мкм. Использование известняка тонкого помола повышает начальную прочность композиционного материала. При введении 10 и 15 % такого известняка прочность возрастает на 16–20 %, а 25–35 % — на 5–8 %. Повышение прочности обусловлено проявлением химической активности известняка и образованием гидрокарбоалюмината кальция $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, который способствует формированию кристаллического каркаса цементной матрицы. Дополнительное образование в начальной формирующейся коагуляционной структуре кристаллических кристаллогидратов приводит к ухудшению удобоукладываемости строительного раствора, но повышает его прочность.

Выводы. Использование известняка грубого помола значительно улучшает удобоукладываемость раствора. Известняк тонкого помола позволяет увеличить его содержание без снижения прочности. Для оптимизации свойств композиционных материалов на основе портландцемента и известняка гранулометрический состав молотого известняка должен быть как можно более близким к гранулометрическому составу цемента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гранулометрический состав известняка, композиционный цемент на основе известняка, прочность, удобоукладываемость, предельное напряжение сдвига, карбоалюминаты кальция, кристаллический каркас цементной матрицы, коагуляционная структура

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Самченко С.В., Александрова О.В., Гуркин А.Ю. Свойства цементных композитов на основе известняка в зависимости от его гранулометрического состава // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 7. С. 999–1006. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.999-1006

Properties of cement composites based on limestone depending on their granulometric composition

Svetlana V. Samchenko, Olga V. Alexandrova, Anton Yu. Gurkin

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The use of limestone in cement compositions as an additional cementing agent solves both environmental and economic problems, namely, reduction of construction costs. In this regard, the study of the properties of the granulometric composition and volumetric content of cement composites, containing limestone, becomes increasingly important. The mission of this research is to optimize the properties of composite materials containing Portland cement and limestone by changing the granulometric composition of flour limestone.

Materials and methods. Limestone, having three different Blaine milling fineness values of 250, 300 and 450 m²/kg, was used; its content reached 10, 15, 25 and 35 %. Cement and sand mortars were applied for testing purposes. The influence of the granulometric composition of limestone on the workability and compressive strength of composite cement was determined.

Results. The effect of limestone on the limit shear stress becomes more pronounced when the amount of limestone increases to 25 and 35 %. This is most noticeable for limestone with a high content of fine fractions of 5–20 μm. The use of finely milled limestone increases the initial strength of the composite material. By adding 10 and 15 % of such limestone we can increase the strength by 16–20 %, and supplementary 25–35 % of limestone increases strength by 5–8 %. Strength enhancement is due to the reactivity of limestone and formation of calcium hydrocarbon aluminate $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, which promotes formation of the crystal framework of the cement matrix. Additional formation of crystalline hydrates in the initial coagulation structure deteriorates the mortar workability, but increases its strength.

Conclusions. The use of coarse-grained limestone significantly improves mortar workability, while the use of fine-grained limestone increases its content without reducing its strength. The granulometric composition of ground limestone shall be as close as possible to the granulometric composition of cement for the properties of composite materials containing Portland cement and limestone to be optimized.

KEYWORDS: limestone granulometric composition, composite cement containing limestone, strength, workability, shear stress limit, calcium carboaluminate, crystalline frame of the cement matrix, coagulation structure

FOR CITATION: Samchenko S.V., Alexandrova O.V., Gurkin A.Yu. Properties of cement composites based on limestone depending on their granulometric composition. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(7):999-1006. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.999-1006 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных, а в некоторых странах и главным решением ресурсо- и энергосбережения в строительной отрасли является использование композиционных портландцементов с минеральными добавками [1–5], что сопряжено с сокращением выбросов CO₂ [6, 7].

В современном научном мире активно изучаются дополнительные цементирующие материалы (Supplementary cementitious materials — SCM's) [1, 8], минералогический состав этих добавок представлен алюмосиликатами кальция. Их поведение в составе цементных композиций обусловлено взаимодействием гидроксида кальция, образующегося при гидратации алита, основного минерала портландцемента, с образованием гидроалюмосиликатов кальция и низкоосновных гидросиликатов кальция [1, 7, 8–11].

Расширение номенклатуры композиционных портландцементов за счет применения доступного минерального сырья в качестве дополнительных цементирующих материалов актуально для строительной отрасли. Ресурсы существующих минеральных добавок не удовлетворяют растущим потребностям отрасли. В качестве альтернативы существующим на сегодняшний день минеральным добавкам используются прокаленные глины [1, 5, 7, 9, 12]. Наибольший эффект в цементных композициях достигается при введении метакаолина — продукта прокаливания каолиновых глин [8–10]. Однако использование каолиновых глин в цементной промышленности ограничивается малыми запасами и высокой потребностью этого материала в других отраслях промышленности (керамика, целлюлозно-бумажная и др.) [13]. В связи с этим вернулись к рассмотрению возможности получения минеральных вяжущих композиций с применением карбоната кальция, который эффективно использовался в Советском Союзе в 60–80 гг. XX в. Тогда же было доказано, что карбонат кальция является не только микронаполнителем в составе цемента, но и проявляет свою химическую активность, образуя гидрокарбоалюминат кальция $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$.

Проведенными многочисленными исследованиями как зарубежных ученых [1–4, 6–8], так и российских исследователей [9, 10, 13–15], показано, что введение карбоната кальция, а также совмест-

ное использование термоактивированных полиминеральных глин и известняков приводит к повышению физико-технических показателей получаемых цементов и бетонов. Во многих работах определялись составы продуктов гидратации как в начальный период, так и в возрасте 28 суток твердения композиционного цементного камня с карбонатом кальция [3, 11, 15] и с комплексной добавкой на основе термоактивированных глин и карбонатной породы [8, 13], или зол и известняка [12]. В некоторых трудах продемонстрировано, что карбонат кальция в малых количествах может вступать в реакцию с алюминатами клинкера, образуя гидрокарбоалюминаты [11, 16, 17], которые, в свою очередь, повышают стойкость этtringита [16, 17]. Однако при высоком содержании известняка явление химической активности минералов клинкера остается невыясненным. Химия процесса влияния карбоната кальция [8] или взаимодействие карбонатных добавок с продуктами гидратации цемента, описанное в работе [11], изучено недостаточно.

Известняк как дополнительный компонент обычно размалывается вместе с клинкером и имеет меньшую твердость, чем портландцементный клинкер, вследствие чего он накапливается в составе тонкой фракции [18]. В определенных пределах эти тонкие частицы известняка могут увеличивать плотность структуры и благодаря этому повышать удобоукладываемость и стойкость бетона. Но оптимизация плотности структуры — сложный процесс [19], который зависит среди прочего от таких параметров, как тонкость помола цемента и объем молотого известняка [20].

В этой связи все более актуальным становится изучение свойств цементных композитов на основе известняка в зависимости от его гранулометрического состава и объемного содержания. Цель исследования — оптимизация свойств композиционных материалов на основе портландцемента и известняка посредством изменения гранулометрического состава молотого известняка.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — цементные композиции на основе портландцемента и молотого известняка. Предмет исследования — изучение влияния гранулометрического состава известняка на удобо-

укладываемость и прочность композиционного цемента на сжатие.

Использовался портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н, характеристика которого представлена в табл. 1. Химический и минералогический составы портландцементного клинкера приведены в табл. 2.

Табл. 1. Характеристика портландцемента

Table 1. Characteristics of Portland cement

Свойства / Properties	
Удельная поверхность (по Блейну), м ² /кг / Blaine specific surface, m ² /kg	340
Плотность цемента, кг/м ³ / Cement density, kg/m ³	3090
Насыпная плотность, кг/м ³ / Bulk density, kg/m ³	1100
Нормальная густота, % / Standard consistency, %	26
Начало схватывания, мин / Time of initial setting, min	175
Конец схватывания, мин / Time of final setting, min	255

В качестве известняка применялась плотная карбонатная порода, характеристика которой показана в табл. 3. Минералогический состав известняка представлен кальцитом.

В исследованиях известняк был размолот в лабораторной шаровой мельнице до удельных поверхностей по Блейну: 250; 300 и 450 м²/кг. Выбор указанных значений удельной поверхности обусловлен следующим: $S_{уд.} = 250$ м²/кг — материал заведомо грубомолотый, $S_{уд.} = 300$ и 450 м²/кг соответствует дисперсности рядового и высокопрочного портландцемента. Гранулометрический состав определяли на лазерном гранулометре Mastersizer. Испытания проведены на цементных композициях, содержащих портландцемент и массовые доли 10, 15, 25, и 35 % измельченного известняка. Исследования осуществляли на цементных растворах при соотношении композиционный цемент : песок 1:3. Определялось влияние гранулометрического состава известняка на удобоукладываемость, 2-, 7- и 28-суточную прочность композиционного цемента на сжатие. Прочность раствора на сжатие определяли по ГОСТ 310.4.

Влияние гранулометрического состава известняка на реологические свойства цементных паст оценивали по изменению динамического напряжения сдвига и пластической вязкости. Измерения динамического напряжения сдвига и пластической вязкости проводились ротационным вискозиметром «Реотест-4» при скоростях сдвига от 27 до 437 с⁻¹ через 10 минут после приготовления смеси.

Табл. 2. Химический и минералогический составы клинкера

Table 2. Clinker chemical and mineralogical composition

Химический состав, % / Chemical composition, %		Минералогический состав, % / Mineralogical composition, %	
CaO	64,89	Алит / Alite	63
SiO ₂	21,63		
Al ₂ O ₃	5,62	Белит / Belite	11
Fe ₂ O ₃	5,15		
MgO	1,68	Трехкальциевый алюминат / Tricalcium aluminate	6
SO ₃	0,59	Алюмоферрит кальция / Calcium aluminoferrite	15

Табл. 3. Характеристика известняка

Table 3. Characteristics of limestone

Свойства / Properties		Химический состав, % / Chemical composition, %	
Твердость по шкале Мооса / Hardness according to the Mohs scale	3	CaO	53,89
Плотность, кг/м ³ / Density, kg/m ³	2800	SiO ₂	1,03
Предел прочности при сжатии, МПа / Ultimate compressive strength, MPa	300	Al ₂ O ₃	0,2
Водопоглощение, % / Water absorption, %	0,1	Fe ₂ O ₃	0,15
Пористость, % / Porosity, %	1,5	MgO	1,62
Морозостойкость, циклы / Frost resistance, cycles	350	Потери при прокаливании / Losses on ignition	43,11

РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

Определение гранулометрического состава известняка

Как и ожидалось, при определении гранулометрического состава известняка, размолотого до различных удельных поверхностей, было получено (рис. 1): у известняка с удельной поверхностью $250 \text{ м}^2/\text{кг}$ основное количество частиц сосредоточено в крупных фракциях, но при этом имеются и мелкие фракции, что обусловлено легкой размываемостью известняка. С увеличением удельной поверхности размер основной фракции смещается к мелким фракциям. Сравнивая гранулометрический состав известняка с удельной поверхностью $300 \text{ м}^2/\text{кг}$ и портландцемента, необходимо отметить, что основная фракция частиц имеет размер $25\text{--}40 \text{ мкм}$. Для портландцемента характерно равномерное распределение частиц в этом диапазоне, а в образце известняка присутствует еще фракция с размером частиц $5\text{--}15 \text{ мкм}$.

Влияние гранулометрического состава известняка на реологические свойства

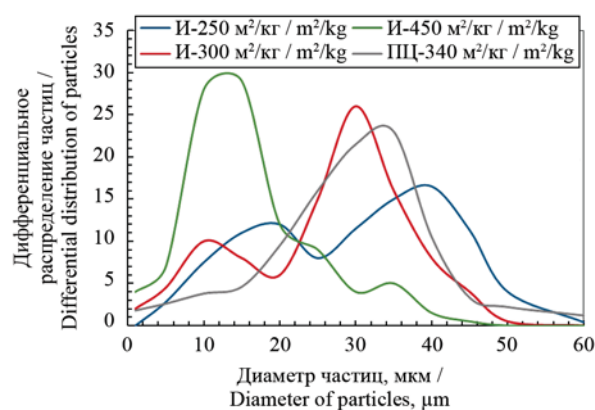
В качестве критерия для оценки рабочих свойств строительного раствора было выбрано предельное напряжение сдвига. Предельное напряжение сдвига использованного портландцемента составляло $17,5 \text{ Н/м}^2$.

Замена до $10\text{--}15 \%$ части цемента известняком не приводит к резкому ухудшению рабочих характеристик, хотя при этом снижается число частиц химически активного клинкера (рис. 2). Использование известняка грубого помола значительно улучшает удобоукладываемость раствора. Известняк с гранулометрическим составом, близким к портландцементу, не оказывает существенного влияния на изменение удобоукладываемости раствора. Тонкомолотый известняк при невысоких содержаниях в составе композиционного вяжущего несколько увеличивает предельное напряжение сдвига раствора. Влияние известняка на предельное напряжение сдвига становится все более выраженным, когда возрастает количество известняка до 25 и 35% (рис. 3). Причем наиболее это ощутимо для известняка с высоким содержанием тонких фракций $5\text{--}20 \text{ мкм}$.

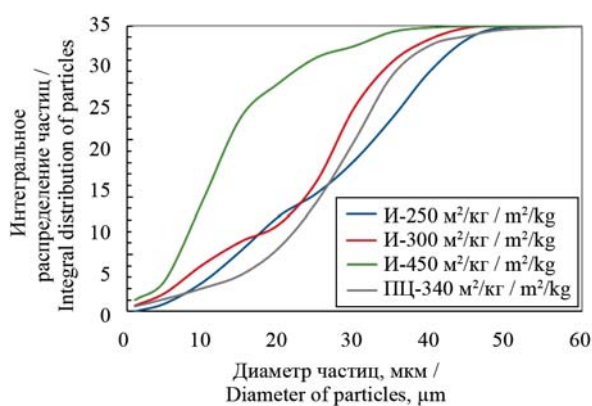
Влияние гранулометрического состава известняка на прочность

В результате снижения количества частиц химически активного клинкера при его замене известняком ожидается снижение прочности на сжатие. Результаты определения прочности на сжатие представлены в табл. 4. Для определения прочностных характеристик цементных композиций изготавливались образцы-балочки из цементного раствора с $\text{В/Ц} = 0,40$ и консистенцией, характеризуемой распылом конуса $106\text{--}115 \text{ мм}$.

Анализ полученных данных позволяет заключить следующее. Использование известняка тон-



a



b

Рис. 1. Гранулометрический состав известняка и портландцемента: а — дифференциальное; б — интегральное распределение частиц

Fig. 1. Granulometric composition of limestone and Portland cement: а — differential distribution of particles; б — integral distribution of particles

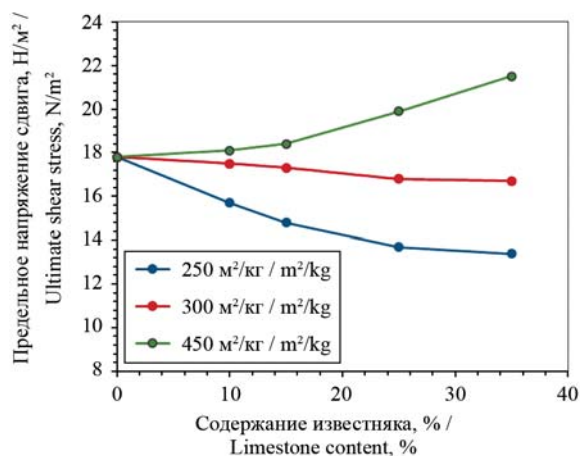


Рис. 2. Предельное напряжение сдвига строительного раствора через 10 мин после приготовления, как функция содержания известняка

Fig. 2. Ultimate Shear stress of the mortar 10 minutes after the preparation as a function of the limestone content

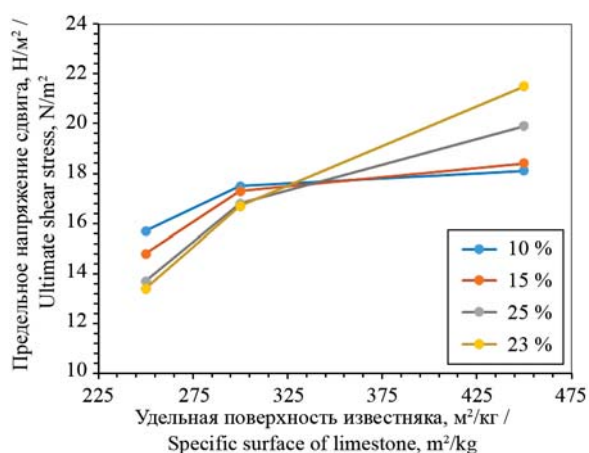


Рис. 3. Предельное напряжение сдвига строительного раствора через 10 мин после приготовления, как функция удельной поверхности известняка

Fig. 3. Ultimate shear stress of the mortar 10 minutes after the preparation as a function of the specific surface of limestone

кого помола с удельной поверхностью 450 м²/кг повышает прочность композиционного материала через 2 сут твердения во всем диапазоне его введения. Причем 10 и 15 % такого известняка повышают прочность на 16–20 %, а 25–35 % повышают прочность на 5–8 %. Такое повышение прочности обусловлено тем, что тонкомолотый известняк в композиционных материалах проявляет химическую активность. Это позволяет увеличить его содержа-

ние без значительного снижения прочности в возрасте 28 сут (рис. 4).

Взаимодействуя с трехкальциевым алюминатом, тонкомолотый известняк образует гидрокарбонат алюмината кальция $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, который способствует формированию кристаллического каркаса цементной матрицы. Дополнительное образование в начальной формирующейся коагуляционной структуре кристаллических кристаллоидов может объяснять повышение предельного напряжения сдвига, что приводит к ухудшению удобоукладываемости строительного раствора.

Использование известняка грубого помола с удельной поверхностью 250 м²/кг приводит к снижению прочности во все сроки твердения и во всем диапазоне его введения (рис. 4). Такой известняк не проявляет химическую активность, а играет роль инертного наполнителя. Инертный наполнитель разрыхляет коагуляционную структуру, что приводит к улучшению удобоукладываемости строительного раствора.

Известняк с удельной поверхностью 300 м²/кг содержит как мелкие, так и крупные частицы. Мелкие частицы известняка способствуют формированию структуры затвердевшего композиционного материала, при этом снижение прочности во всем диапазоне его введения в 2 сут составляет 5,6–12 %, а в 28 сут — 1,8–11 %. Крупные частицы такого известняка несколько снижают предельное напряжение сдвига, т.е. не ухудшают рабочие свойства строительного раствора.

Табл. 4. Прочность композиционных материалов

Table 4. Strength of composite materials

Удельная поверхность известняка, м²/кг / Specific surface of limestone, m²/kg	Количество известняка, % / Limestone quantity, %	Расплыв конуса цементного раствора (В/Ц = 0,40), мм / Cement mortar flow (W/C = 0.40), mm	Прочность на сжатие, МПа / Compressive strength, MPa		
			2 сут / 2 days	7 сут / 7 days	28 сут / 28 days
—	—	112	26	32,5	46,5
250	10	113	24,6	29,8	42,3
250	15	113	23,4	26,7	40,6
250	25	114	20,1	23,6	38,5
250	35	114	18,4	21,1	36,1
300	10	112	25,8	33,7	45,7
300	15	111	25,1	31,8	44,3
300	25	110	23,4	30,6	42,8
300	35	110	22,9	29,8	42,2
450	10	110	31,2	35,8	46,2
450	15	109	30,1	34,8	45,3
450	25	109	28,1	32,5	44,2
450	35	108	27,4	31,6	43,9

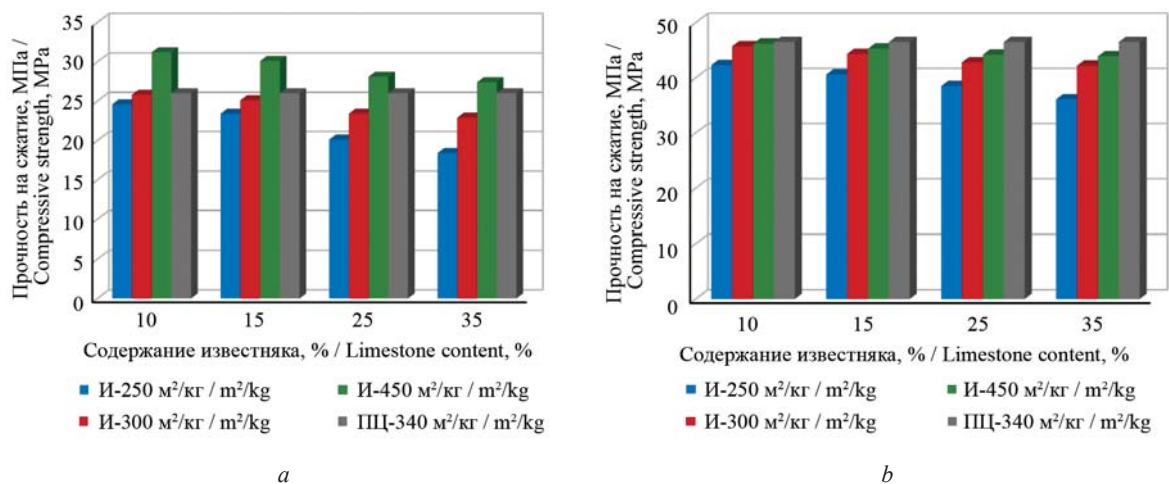


Рис. 4. Прочность на сжатие, как функция содержания известняка: *a* — через 2 сут твердения; *b* — через 28 сут твердения
 Fig. 4. Compressive strength as a function of the limestone content: *a* — after 2 days of curing; *b* — after 28 days of curing

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- лабораторными испытаниями установлено, что тонкость помола известняка влияет на эксплуатационные свойства изготовленного из него цементного композита. Оптимизация свойств композиционных материалов на основе портландцемента и известняка может быть достигнута посредством изменения гранулометрического состава молотого известняка;
- известняк грубого помола проявляет свойства инертного наполнителя. Его использование в составе композиционного материала значительно улучшает рабочие свойства строительного раствора. Но при этом снижает прочность на сжатие, особенно при большом содержании (25–35 %);
- использование известняка тонкого помола позволяет увеличить его содержание без снижения

прочности. Тонкомолотый известняк проявляет химическую активность и способствует формированию кристаллического каркаса цементной матрицы. Образование в начальной формирующейся коагуляционной структуре дополнительных кристаллических кристаллогидратов приводит к повышению предельного напряжения сдвига, что приводит к ухудшению удобоукладываемости строительного раствора;

- оптимизация свойств композиционных материалов на основе портландцемента и известняка может быть достигнута при использовании известняка, гранулометрический состав которого близок к гранулометрическому составу цемента. Тонкая фракция известняка проявляет химическую активность, при этом не снижая прочности, а крупная фракция способствует улучшению рабочих свойств строительного раствора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lothenbach B., Scrivener K., Hooton R.D. Supplementary cementitious materials // *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41. Pp. 1244–1256. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.12.001
2. Zhang S., Lu D., Xu Z. Effect of dolomite powders on the hydration and strength properties of cement mortars // *Proc. XIV International Congress on the Chemistry of cement*. Beijing, China, 2015. Pp. 320–328.
3. Nocun-Wczelik W., Szybalski M., Zugaj E. Hydration of Portland cement with Dolomite // *Proc. XIV International Congress on the Chemistry of cement*, Beijing, China. 2015. Pp. 154–162.
4. Штатк Й. Гидратация цемента и микроструктура бетона // *Цемент и его применение*. 2011. № 2. С. 90–94.
5. Калашиников В.И., Тараканов О.В. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения // *Строительные материалы*. 2017. № 1–2. С. 62–67. DOI: 10.31659/0585-430x-2017-745-1-2-62-67
6. Ludwig H.-M. CO₂-arme Zemente für nachhaltige Betone: Ibausil. Weimar. Deutschland, 2015. Band 2. Pp. 7–32.
7. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 114. Pp. 2–26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
8. Antoni M., Rossen J., Martirena F., Scrivener K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone // *Cement and Concrete*

Research. 2012. Vol. 42. Issue 12. Pp. 1579–1589. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.09.006

9. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. Строительство и минеральные вяжущие прошлого, настоящего и будущего // Строительные материалы. 2013. № 2. С. 202–210.

10. Ермилова Е.Ю., Камалова З.А., Рахимов Р.З., Стоянов О.В., Савинков С.А. Термически-активированная глина как альтернативная замена метакеолина в композиционных портландцементных // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 4. С. 175–178.

11. Козлова В.К., Маноха А.М., Скаун В.П., Малова Е.Ю., Божок Е.В. Особенности состава продуктов гидратации композиционных портландцементов с карбонатсодержащими добавками // Цемент и его применение. 2014. № 4. С. 102–105.

12. Radlinski M., Olek J. Investigation into the synergistic effects in ternary cementitious systems containing portland cement, fly ash and silica fume // Cement and Concrete Composites. 2012. Vol. 34. Issue 4. Pp. 451–459. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.11.014

13. Ермилова Е.Ю., Камалова З.А., Рахимов Р.З., Щелконогова Я.В. Определение состава продуктов гидратации композиционного цементного камня с комплексной добавкой термоактивированной полиминеральной глины и известняка // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 4 (42). С. 289–295.

14. Ермилова Е.Ю., Камалова З.А., Рахимов Р.З., Хантимиров А.Г., Габбасов Д.А. Иссле-

дование влияния добавок карбонатных пород на физико-механические свойства композиционного цемента // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 4 (38). С. 351–358.

15. Тараканов О.В., Калашиников В.И., Белякова Е.А., Степкина К.А. Оценка влияния карбонатного микронаполнителя на кинетику начального структурообразования и состав гидратных фаз цементных систем // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 2. С. 40–46.

16. Zajac M., Rossberg A., Le Saout G., Lothenbach B. Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements // Cement and Concrete Composites. 2014. Vol. 46. Pp. 99–108. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.11.007

17. Samchenko S.V., Kouznetsova T.V. Resistance of the calcium sulphoaluminate phases to carbonation // Cement, Wapno, Beton. 2014. № 5. Pp. 317–322.

18. Больте Г., Заяц М. Требования к известняку для цементов с высоким содержанием известняка // Цемент. Известь. Гипс. 2016. № 1. С. 42–49.

19. Самченко С.В. Формирование и генезис структуры цементного камня: монография. М.: Московский государственный строительный университет; Ай Пи Эр Медиа; ЭБС АСВ, 2016. 284 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/49874>

20. Samchenko S., Larsen O., Gurkin A. The effect of dispersion of limestone on the properties of cement mortar // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 19. Pp. 2068–2071. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.076

Поступила в редакцию 6 февраля 2020 г.

Принята в доработанном виде 17 марта 2020 г.

Одобрена для публикации 26 июня 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Светлана Васильевна Самченко — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 653449, Scopus: 56575166100, ResearcherID: E-9534-2017, ORCID: 0000-0002-3523-593X; SamchenkoSV@mgsu.ru;

Ольга Владимировна Александрова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 790072, Scopus: 57194450051, 57192372475, ORCID: 0000-0003-1791-8515; AleksandrovaOV@mgsu.ru;

Антон Юрьевич Гуркин — аспирант кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 995814; GurkinAYU@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Lothenbach B., Scrivener K., Hooton R.D. Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*. 2011; 41:1244–1256. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.12.001

2. Zhang S., Lu D., Xu Z. Effect of dolomite powders on the hydration and strength properties of cement

mortars. *Proc. XIV International Congress on the Chemistry of cement, Beijing, China*. 2015; 320–328.

3. Nocun-Wczelik W., Szybalski M., Zugaj E. Hydration of Portland cement with Dolomite. *Proc. XIV International Congress on the Chemistry of cement. Beijing, China*, 2015; 154–162.

4. Stark J. Hydration of cement and microstructure of concrete. *Cement and its Application*. 2011; 2:90-94. (rus.).
5. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V. On the use of complex additives in new generation concrete. *Construction Materials*. 2017; 1-2:62-67. (rus.). DOI: 10.31659/0585-430x-2017-745-1-2-62-67
6. Ludwig H.-M. *CO₂-arme Zemente für nachhaltige Betone: Ibausil. Weimar. Deutschland*, 2015; 2:7-32.
7. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*. 2018; 114:2-26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
8. Antoni M., Rossen J., Martirena F., Scrivener K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cement and Concrete Research*. 2012; 42(12):1579-1589. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.09.006
9. Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R. Construction and mineral binding the past, present and future. *Construction Materials*. 2013; 2:202-210. (rus.).
10. Ermilova E.Yu., Kamalova Z.A., Rakhimov R.Z., Stoyanov O.V., Savinkov S.A. Thermally activated clay as an alternative substitute for metakaolin in composite Portland cement. *Herald KTU*. 2015; 18(4):175-179. (rus.).
11. Kozlova V.K., Manokha A.M., Skakun V.P., Malova E.Y., Bozhok E.V. Composition of hydration products of composite portland cement with carbonate-containing additives. *Cement and its Applications*. 2014; 4:102-105. (rus.).
12. Radlinski M., Olek J. Investigation into the synergistic effects in ternary cementitious systems containing portland cement, fly ash and silica fume. *Cement and Concrete Composites*. 2012; 34(4):451-459. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.11.014
13. Ermilova E.Yu., Kamalova Z.A., Rakhimov R.Z., Shchelkonogova Y.V. Hydration products composition of blended cement stone with a complex additive calcined polymineral clay and limestone. *Proceedings of the Kazan State University of architecture and construction*. 2017; 4(42):289-295. (rus.).
14. Ermilova E.Yu., Kamalova Z.A., Rakhimov R.Z., Khantimirov A.G., Gabbasov D.A. The research of the influence of carbonate additives on the physico-mechanical properties of the blended cement. *Proceedings of the Kazan State University of architecture and construction*. 2016; 4(38):351-358. (rus.).
15. Tarakanov O.V., Kalashnikov V.I., Belyakova E.A., Steshkina K.A. Evaluation of the effect of carbonate microfiller on the kinetics of initial structure formation and the composition of the hydrated phases of cement systems. *Regional Architecture and Construction*. 2014; 2:40-46. (rus.).
16. Zajac M., Rossberg A., Le Saout G., Lothenbach B. Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Composites*. 2014; 46:99-108. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.11.007
17. Samchenko S.V., Kouznetsova T.V. Resistance of the calcium sulphoaluminate phases to carbonation. *Cement, Wapno, Beton*. 2014; 5:317-322.
18. Bolte G., Zayats M. Limestone requirements for cements with high limestone content. *Cement. Lime. Gypsum*. 2016; 1:42-49. (rus.).
19. Samchenko S.V. Formation and genesis of the structure of cement stone: monograph. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering; IPP Media; DIA EDS, 2016; 284. URL: <http://www.iprbookshop.ru/49874> (rus.).
20. Samchenko S., Larsen O., Gurkin A. The effect of dispersion of limestone on the properties of cement mortar. *Materials Today: Proceedings*. 2019; 19:2068-2071. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.076

Received February 6, 2019

Adopted in a revised form on March 17, 2020.

Approved for publication June 26, 2020

BIONOTES: **Svetlana V. Samchenko** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology of Binders and Concretes; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 653449, Scopus: 56575166100, ResearcherID: E-9534-2017, ORCID: 0000-0002-3523-593X; SamchenkoSV@mgsu.ru;

Olga V. Alexandrova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Binders and Concretes; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 790072, Scopus: 57194450051, 57192372475, ORCID: 0000-0003-1791-8515; AleksandrovaOV@mgsu.ru;

Anton Yu. Gurkin — graduate student of the Department of Technology of Binders and Concretes; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 995814; GurkinAYU@mgsu.ru.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 628.35:69.059.7

DOI:10.22227/1997-0935.2020.7.1007-1017

Исследования разложения углеводов на реконструированных очистных сооружениях ОАО «Автодеталь»

И.И. Иваненко¹, Е.Я. Лапатина¹, П.И. Смирнов²

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
(СПбГАСУ); г. Санкт-Петербург, Россия;

² АвтоДеталь; г. Выборг, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Новизна исследований обусловлена повышающейся степенью загрязнения окружающей среды веществами антропогенного происхождения, возникающими аварийными и чрезвычайными ситуациями, необходимостью в разработке новейших методов их деструкции. Одним из возможных путей в этом направлении может быть более широкое применение в технологии очистки сточных вод от органических и минеральных загрязнений специальных селекционных микроорганизмов, способных использовать в качестве терминальных акцепторов электронов химические элементы с переменной валентностью.

Материалы и методы. Провели обзор литературных источников, лабораторные исследования по стандартным и современным методикам с применением аналитического оборудования.

Результаты. К основным результатам можно отнести реконструкцию очистных сооружений ОАО «Автодеталь» с использованием способа замены загрузки в существующей биобашне на загрузку волокнистым носителем с иммобилизованной ассоциацией нефтеокисляющих микроорганизмов. Ассоциация была получена в ходе предшествующих лабораторных исследований. На основе наиболее активных азотфиксирующих нефтеокисляющих культур: *Rhodococcus erythropolis*, *Pseudomonas fluorescens*, *Arthrobacter tumescens*, *Pseudomonas rathonis*, *Azotobacter chroococcum* в равных соотношениях создан биопрепарат, предназначенный для разложения нефти и ее компонентов на производные в окружающей водной среде, который был иммобилизован на волокнистую загрузку и загружен в биобашню.

Выводы. В ходе работ первого этапа выделены специальные культуры для проведения очистки от углеводов антропогенного происхождения с азотфиксирующими свойствами для сокращения антропогенного вторичного загрязнения водоема. На втором этапе осуществлена реконструкция очистных сооружений ОАО «Автодеталь» и получены эксплуатационные результаты, позволяющие утверждать возможность применения биологического способа трансформации загрязнений с высоким эффектом очистки по: взвешенным веществам — 99,7 %; нефтепродуктам — 98,3 %; ХПК — 89,2 %; азоту аммонийных солей — 77,9 %; фосфору минеральному — 53,3 %.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: биологическая очистка, иммобилизация микроорганизмов, волокнистая загрузка, очистные сооружения, реконструкция, биобашня

Благодарности: Авторы выражают благодарность всем рецензентам и авторскому коллективу издания за публикацию данных материалов.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Иваненко И.И., Лапатина Е.Я., Смирнов П.И. Исследования разложения углеводов на реконструированных очистных сооружениях ОАО «Автодеталь» // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 7. С. 1007–1017. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.1007-1017

Research into decomposition of hydrocarbons at restructured treatment facilities of Autodetail Open Joint Stock Company

Irina I. Ivanenko¹, Elena Ya. Lapatina¹, Pavel I. Smirnov²

¹ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
St. Petersburg, Russian Federation;

² AvtoDetail; Vyborg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The novelty of the research is driven by the growing environmental contamination with anthropogenic substances, and in the course of accidents and emergency situations, as well as the need to develop the most advanced methods of their elimination. More intensive application of selected micro-organisms, capable of using variable valency chemicals as terminal acceptors, can help to treat wastewater from organic and mineral pollutants.

Materials and methods. The co-authors have performed a review of literature and used analytical equipment to conduct laboratory researches according to standard and advanced methodologies.

Results. The principal results include the restructuring of the treatment facilities operated by Autodetail Open Joint Stock Company. The restructuring consisted in the feeding process change in the currently used biological tower for the feeding to be performed with the help of the fiber carrier and immobilized association of oil oxidizing microorganisms. The association was obtained in the course of earlier laboratory researches. The most active nitrogen-gathering and oil oxidizing cultures, including *Rhodococcus erythropolis*, *Pseudomonas fluorescens*, *Arthrobacter tumescens*, *Pseudomonas rathonis*, *Azotobacter chroococcum*, taken in equal parts, helped to develop a bio-product designated for the decomposition of oil and its components in the aquatic environment. This bio-product was immobilized in respect of the feeding to be performed with the help of the fiber carrier and loaded into the production company's biological tower which is part of idle wastewater treatment facilities.

Conclusions. In the course of the work performed at the first stage, special cultures were selected for the treatment of water from hydrocarbons of anthropogenic origin. These cultures had nitrogen-fixing properties needed to reduce secondary anthropogenic pollution of the water body. At the second stage, water treatment facilities of Autodetail Open Joint Stock Company were restructured and operation-related results were obtained. They enabled the researchers to make a statement that the biological transformation of pollutions was efficiently applicable to the suspended matter — 99.7 %; oil products — 98.3 %; COD — 89.2 %; nitrogen of ammonium salts — 77.9 %; mineral phosphorus — 53.3 %.

KEYWORDS: biological treatment, immobilization of microorganisms, fiber feeding, treatment facilities, restructuring, biological tower

Acknowledgements: The co-authors would like to express gratitude to all reviewers and the writing team for the publication of this article.

FOR CITATION: Ivanenko I.I., Lapatina E.Y., Smirnov P.I. Research into decomposition of hydrocarbons at restructured treatment facilities of Autodetail Open Joint Stock Company. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(7):1007-1017. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.1007-1017 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Развитие экономики приводит к загрязнению почв, подземных вод и поверхностных водоемов различными загрязняющими компонентами, в том числе углеводородами. Углеводороды, попадающие в природную среду, вызывают негативные изменения в естественном биоценозе и усложняют экологическую ситуацию. Создание технологий для снижения их негативного влияния на окружающую среду является насущной задачей современного этапа развития экономики [1, 2]. Бережное использование ресурсов, энергосбережение и внедрение экологически безвредных технологических схем очистки представляются наиболее актуальными задачами современности.

Развитие биологических технологий для очистки сточных вод, почв и других загрязненных природных участков — важное направление, ввиду использования природных микроорганизмов и минимизации экологической нагрузки на окружающую среду [3, 4]. В технологии биodeградации нефтяных загрязнений, используемых в практике, можно выделить два основных подхода [5, 6]:

- первый основан на интенсификации микрофлоры природного или искусственно созданного биоценоза путем применения различных технологических принципов: перемешивания, аэрирования, добавления питательных элементов и микроэлементов и т.п.;
- второй — на введении в загрязненную экосистему специально селекционированных углеводородоксилирующих микроорганизмов и создании оптимальных условий для их функционирования (например, окислительно-восстановительного потенциала). Второй метод представляется более перспективным и более экономически оправданным, он и принят авторами за основу.

Российские очистные сооружения, построенные в прошлом веке и ориентированные на использование большого количества кислорода, были рассчитаны на удаление содержания взвешенных и органических веществ [7, 8]. На современном этапе качество очищенных стоков очистных станций не может соответствовать нормативным требованиям, а расходы на традиционную аэробную очистку слишком велики [9]. Сокращение расходов на очистные сооружения возможно при применении различных окислительно-восстановительных процессов в биоблоках биологической ступени очистки и использовании терминальных акцепторов электронов [10].

Биологическая трансформация углеводородов в присутствии кислорода — известное и достаточно хорошо изученное явление [11, 12]. В аэробных условиях большинство гетеротрофных микроорганизмов используют углеводородные соединения как единственный источник питания. В то же время доказано, что кислород не является единственным и незаменимым акцептором электронов при микробном окислении углеводородов, существуют микроорганизмы, которые способны переносить электроны из органических соединений на элементы с переменной валентностью, в частности на азот, серу, хром, железо, марганец и т.п., в их частично или полностью окисленной форме [13, 14].

Анализ проведенных исследований последних лет различных авторов свидетельствует о том, что микробная трансформация многих углеводородов, которые входят в состав нефти, возможна в бескислородной среде. Биологическая очистка загрязняющих веществ сопровождается обычно появлением

побочного продукта — избыточного активного ила, который требует удаления с площадки очистных сооружений и вызывает дополнительные расходы и, как следствие, повышение себестоимости обработки сточных вод. Прирост активного ила в анаэробных/анаэробных условиях ведения очистки снижается [15]. Трансформацию многих углеводов осуществляют многочисленные представители разных родов бактерий, которые относятся к факультативным, облигатно-анаэробным, а при некоторых условиях даже и к облигатно-аэробным группам микроорганизмов. Микробное расщепление углеводов при отсутствии молекулярного кислорода в среде предопределяется наличием альтернативных акцепторов электронов. Решающее значение для начала реакции трансформации углеводов, скорости ее протекания, имеет величина окислительно-восстановительного потенциала среды.

Повышение дозы микроорганизмов в сооружениях также позволяет увеличить скорость биологической трансформации в сооружениях [16]. Для повышения дозы ила применяются различные насадки или загрузки, помещаемые в биоблоки сооружений [17]. В последнее время количество таких материалов увеличивается, но ряд из них вызывает достаточно много сложностей при эксплуатации биоблоков, в основном связанных с обрастанием загрузок и необходимостью их периодической регенерации [18].

Краткий анализ литературных источников позволяет сформулировать следующие подходы, принятые авторами за основу при проведении исследований. Для трансформации углеводородных загрязнений необходимо использовать:

- биологический способ трансформации;
- анаэробные/безкислородные условия ведения очистки;

- метод повышения дозы микроорганизмов путем использования волокнистых загрузок при очистке;

- селекцию микроорганизмов для подбора способных прикрепляться к поверхности загрузки легко и надежно, а также вести трансформацию загрязнений;

- представителей различных таксонометрических групп с учетом их нитрогеназной способности и способности ассимилировать из воздуха азот для минимизации затрат на процесс трансформации и возможности обеспечения потребностей микроорганизмов в биогенных элементах для жизнедеятельности.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из сырой нефти ООО ПО «Киришинефтеоргсинтез» методом двойной селекции по О.В. Клямару и Л.С. Самойленко была выделена ассоциация азотфиксирующих нефтеокисляющих микроорганизмов с деструктивными и иммобилизованными свойствами, которая состояла из бактерий и дрожжеподобных грибов [19–21]. Селекцию в ходе исследований проводили и по третьему признаку — способности микроорганизмов к азотфиксации в лабораторном биореакторе, выполненном из корпуса емкости очистной станции Vortex 5 с полезным объемом биореактора — 22 дм³. Исследования осуществлялись в условиях проточного культивирования (рис. 1). Биореактор сконструирован так, что неполными перегородками он разделен на шесть отсеков, что обеспечивает зигзаговидное движение воды в сооружении. В первый отсек вносили дизельное топливо в количестве 0,1–1 дм³. Из второго отсека вода рециркулировала через слой

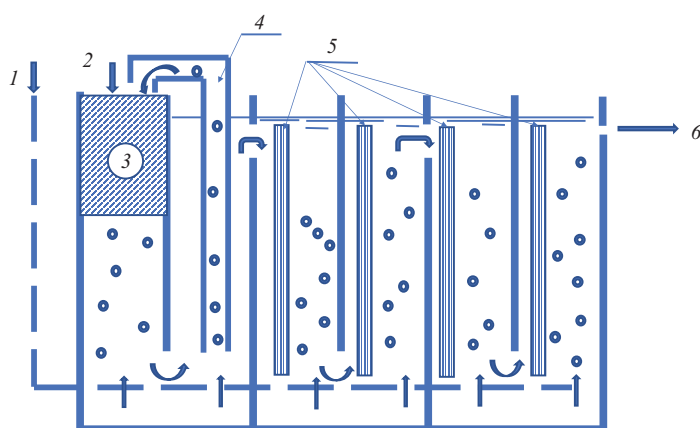


Рис. 1. Схема биореактора: 1 — воздух; 2 — минеральный раствор; 3 — слой нефтепродуктов; 4 — эрлифт; 5 — волокнистый носитель; 6 — очищенная вода

Fig. 1. The flow diagram of a bioreactor: 1 — air; 2 — mineral solution; 3 — layer of oil products; 4 — air lift; 5 — fiber carrier; 6 — treated water

нефтепродуктов первого отсека для насыщения ее углеводородами и интенсивной селекции микроорганизмов-деструкторов. Кроме того, в первый отсек непрерывно подавали водный раствор биогенных элементов — фосфора, калия, магния и микроэлементов со скоростью $0,01 \text{ ч}^{-1}$, при этом азот не вносили.

Ассоциации других микроорганизмов, кроме селектированных специально, также не использовали. Отсутствие доступного источника азота (незначительная его концентрация) дает селективное преимущество в этих экстремальных условиях для развития микроорганизмов, которые способны обеспечивать свои метаболические потребности в азоте путем ассимилирования его из атмосферы.

Из литературных источников известна высокая заселенность нефтепродуктов микроорганизмами [22]. Для селекции азотфиксирующей ассоциации нефтеокисляющих микроорганизмов использована аборигенная микрофлора сырой нефти, полученная на первом этапе исследований. В 3–6 отсеках лабораторного биореактора размещали по 150 г волокнистого носителя для иммобилизации и наращивания на нем биомассы нефтеокисляющих азотфиксирующих микроорганизмов в процессе селекции (рис. 2).



Рис. 2. Волокнистый носитель, размещенный в емкости биореактора

Fig. 2. Fiber carrier, placed into bioreactor tanks

Микрокомпрессором осуществляли постоянную аэрацию среды в биореакторе при средней концентрации растворенного кислорода на уровне $2\text{--}2,5 \text{ мг О}_2/\text{л}$. Процесс проводили при температуре $10\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$. В очищенной воде после биореактора устанавливали концентрацию нефтепродуктов по стандартной весовой методике и, в некоторых опытах, методом атомно-сорбционного определения.

После образования биопленки на поверхности волокнистого носителя изучали деструктивную активность иммобилизованной азотфиксирующей ассоциации микроорганизмов. Кроме того, по мере накопления на носителе значительной биомассы, ее вынимали из установки, высушивали и хранили для последующих исследований и использования с целью очистки воды от нефтепродуктов в реальных условиях, а в биореактор вносили новый волокнистый носитель без микроорганизмов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В проведенных исследованиях создание оптимальных условий культивирования «аборигенных» микроорганизмов нефти путем внесения необходимых биогенных элементов (фосфора, калия, магния и микроэлементов) и речной воды привело к интенсивному их размножению уже на пятые сутки проведения опыта. Развитие микроорганизмов в первые сутки культивирования сопровождалось образованием большого количества слизи, что, в свою очередь, приводило к эмульгированию нефтепродуктов и, как результат, увеличивало их концентрацию в воде до 1000 мг/дм^3 . Продуцирование клетками значительных количеств слизи можно объяснить отсутствием в культуральной среде доступных соединений азота, потому что в безазотной среде микроорганизмы синтезируют полисахариды. По мере размножения и наблюдающегося при помощи ежедневного микроскопирования ила, доминирования в биореакторе микроорганизмов, которые способны обеспечивать свои потребности в азоте путем азотфиксации, слизиобразование значительно уменьшилось, а со временем полностью прекратилось.

Через месяц работы лабораторного биореактора селекционированная ассоциация азотфиксирующих микроорганизмов — деструкторов нефтепродуктов минерализовала 10 г дизельного топлива за сутки при концентрации иммобилизованных клеток в сооружении 200 г (по сухой массе) вещества. В свободноплавающем состоянии количество клеток не превышало 104 кл/см^3 . При внесении 100 см^3 сырой нефти в первый отсек установки полное ее разложение происходило за 31 сут, т.е. за сутки 200 г биомассы (по сухой массе) перерабатывалось (минерализировалось) в $2,3 \text{ г}$ нефтепродуктов. Пленка нефти в первом отсеке практически отсутствовала, а в растворе концентрация углеводов не превышала $0,3 \text{ мг/дм}^3$ при скорости разведения $0,01 \text{ ч}^{-1}$.

Значительно более медленно проходило расщепление углеводов сырой нефти в биореакторе по сравнению с дизельным топливом (10 г за сутки против $2,3 \text{ г}$ за сутки) при одинаковом количестве биомассы. Такой результат обусловлен присутствием в нефти очень стойких к окислению, даже селекционированными микроорганизмами, высоко-

молекулярных полициклических ароматических и гетероциклических соединений.

Из селекционированной ассоциации биоприноса биореактора было выделено 25 штаммов культур микроорганизмов, которые имели разную деструктивную активность относительно углеводов парафиновой фракции дизельного топлива и азотфиксирующую способность. Наиболее активные — идентифицированы [23, 24]. При оптической плотности суспензии 10^6 – 10^7 кл/см³ изолированные штаммы в условиях азотфиксации используют нефтепродукты с разной эффективностью.

Наибольшая степень деструкции углеводов парафиновой фракции дизельного топлива в условиях азотфиксации характерна для штамма *Rhodococcus erythropolis* R-2 — 680 мг/дм³сут. За 7 сут она становится 58 % при начальном внесении 8,26 г/дм³. В среде с достаточным обеспечением клеток аммонийным азотом эта величина достигает 72 %, т.е. за сутки минерализуется 850 мг/дм³ углеводов. Для наиболее активных из изолированных культур эта величина при росте на углеводах дизельного топлива составила:

- *Yarrowia lipolytica* — 83 мг/дм³сут;
- *Rhodococcus erythropolis* R-2 — 680 — “—”;
- *Pseudomonas rathonis* P-17 — 440 — “—”;
- *Azotobacter chroococcum* Z-1 — 410 — “—”;
- *Azotobacter sp.* — 450 — “—”;
- *Pseudomonas fluorescens* P-9 — 420 — “—”;
- *Arthrobacter tumescens* A-7 — 310 — “—”;

Нитрогеназную активность выделенных штаммов-деструкторов определяли ацетилен-редуктивным методом [25] при культивировании в жидкой модифицированной среде CS7 [26], где единственными источниками углерода и энергии были глюкоза (контроль) и дизельное топливо (опыт) — 10 г/дм³. Белок в опытах определяли по Лоури [27].

В результате исследования нитрогеназной активности была установлена способность бактериальных штаммов ассимилировать атмосферный азот. Дрожжеподобный штамм *Yarrowia lipolytica* восстанавливал азот в количествах, которые находятся в пределах погрешности. Таким образом, нет убедительных доказательств, что *Yarrowia lipolytica* фиксирует атмосферный азот. Наибольшую нитрогеназную активность при росте на глюкозе проявляет штамм *Azotobacter sp.*, которая составляет 12,82 нмоль C₂H₄/мг белка в час. В то же время при росте на углеводах дизельного топлива, ассимиляция азота активнее протекает в чистой культуре *Rhodococcus erythropolis* R-2 и равняется 10,52 нмоль C₂H₄/мг белка в час. Максимальную нитрогеназную активность имеет ассоциация культур-деструкторов, которая при росте на нефтепродуктах дизельного топлива составляет 23,7 нмоль C₂H₄/мг белка в час, что в 2,3 раза превышает азотфиксирующую способность *Rhodococcus erythropolis* R-2. В условиях периодического куль-

тивирования исследованы деструктивные свойства ассоциации. Результаты показали, что на седьмые сутки культивирования деструкция парафиновых углеводов у сред без азота составляет 68 %, тогда как в присутствии аммонийного азота она достигала 87 %.

На основе наиболее активных азотфиксирующих нефтеокисляющих культур: *Rhodococcus erythropolis*, *Pseudomonas fluorescens*, *Arthrobacter tumescens*, *Pseudomonas rathonis*, *Azotobacter chroococcum*, которые были иммобилизованы на волокнистом носителе в равных соотношениях в биореакторе, создан биопрепарат с условным названием «А1», предназначенный для разложения нефти и ее компонентов на производные в окружающей водной среде. Биопрепарат «А1» с успехом использован для очистки нефтесодержащих сточных вод ОАО «Автодеталь». Технологическая схема (рис. 3) локальных очистных сооружений включает:

- нефтеловушку, в которой удаляются нерастворимые нефтепродукты;
- флотатор, который доводит содержащее нефтепродуктов в воде до 20–25 мг/дм³,
- биобашню — капельный биофильтр, в котором, как загрузка, использован волокнистый носитель с иммобилизованной ассоциацией нефтеокисляющих микроорганизмов.

Результаты работы реконструированной станции представлены в табл. и на рис. 4–6. Период наблюдения совпал с периодом проведения пусконаладочных работ и началом периода эксплуатации станции. Концентрации на входе на очистные сооружения не фиксировались ввиду того, что для исследований интерес представляла оценка работы и скорости деструкции нефтепродуктов реконструированным узлом, включающим блок биологической загрузки. Раз в неделю проводился сокращенный химический анализ усредненных проб. Раз в месяц выполнялся полный анализ стоков по показателям, определенным в паспорте предприятия. Соединения азота в стоках наблюдаются из-за присутствия выпусков фекальных вод в сеть канализации, оканчивающихся очистными сооружениями, а соединения фосфора поступают с частью производственных (моечных) вод.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований наибольшая степень деструкции углеводов парафиновой фракции дизельного топлива в условиях азотфиксации характерна для штамма *Rhodococcus erythropolis* R-2 — 680 мг/дм³сут. В среде с достаточным обеспечением клеток аммонийным азотом эта величина достигает 72 %, т.е. за сутки минерализуется 850 мг/дм³ углеводов.

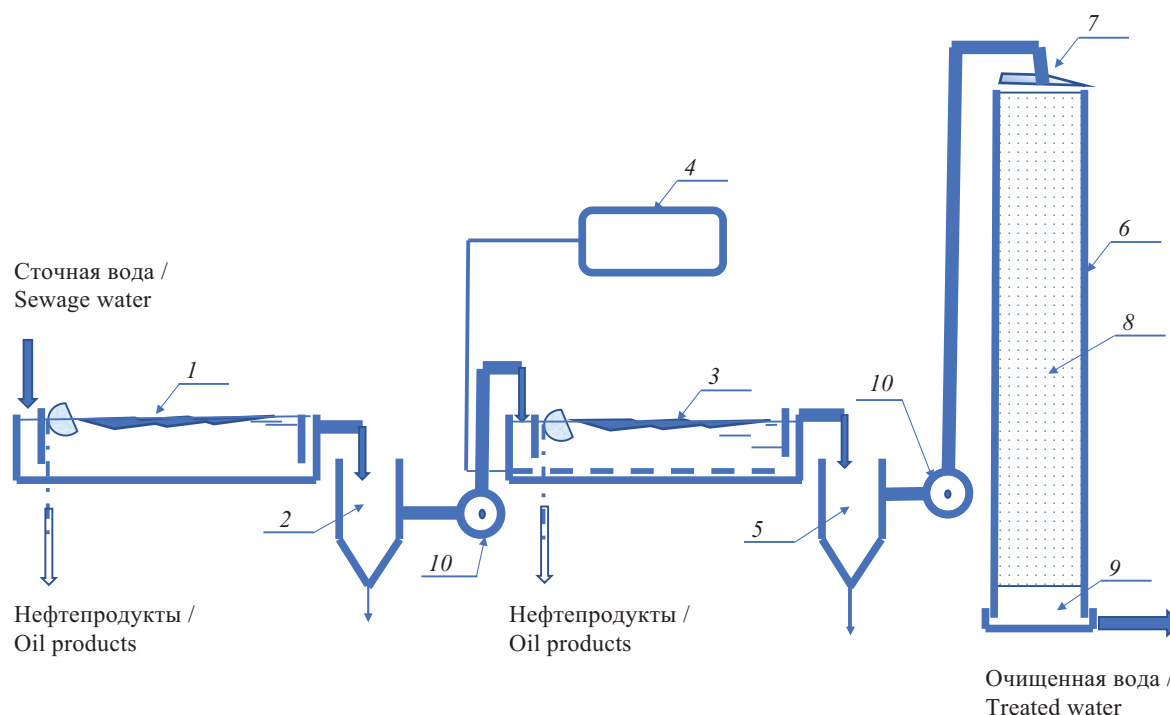


Рис. 3. Технологическая схема очистного сооружения поверхностного стока после реконструкции: 1 — нефтеловушка; 2 и 5 — промежуточные вертикальные отстойники; 3 — флотатор; 4 — компрессор подачи воздуха; 6 — биобашня; 7 — распылитель; 8 — биозагрузка с иммобилизованной микрофлорой (биопрепарат «А1»); 9 — поддон для сбора очищенной воды; 10 — насосы

Fig. 3. The flow chart of a restructured treatment facility designated for the overflow: 1 — oil separator; 2 and 5 — intermediate vertical settling basin; 3 — flotation unit; 4 — air compressor; 6 — biological tower; 7 — sprinkler; 8 — biological feeding with immobilized microflora (bio-product «A1»); 9 — treated water tray; 10 — pumps

Результаты наблюдения за очистными сооружениями после реконструкции

Results of observation of treatment facilities after reconstruction

Период наблюдения, Недели / Observation period, weeks	Концентрации загрязняющих компонентов, мг/л / Concentration of contaminating components, mg/l					
	После отстаивания / After the settlement			После отстаивания / After the settlement		
	Взвешенные вещества / Suspended matter	Нефте-продукты / Oil products	Азот аммонийных солей / Nitrogen of ammonium salts	Взвешенные вещества / Suspended matter	Нефте-продукты / Oil products	Азот аммонийных солей / Nitrogen of ammonium salts
1	10,23	0,33	—**	2,63	0,3*	—
2	10,89	0,59	—	5,01	0,3*	—
3	18,45	1,23	—	8,95	0,47	—
4	13,38	3,83	—	3,45	1,97	—
5	8,32	4,23	—	3,04	1,79	—
6	6,85	1,03	5,61	3,37	—	1,04
7	18,39	3,01	0,31	8,37	1,7	0,3
8	27,06	5,89	1,76	17	3,5	0,47
9	14,39	0,86	2,04	12	0,3*	0,3

Окончание

Период наблюдения, Недели / Observation period, weeks	Концентрации загрязняющих компонентов, мг/л / Concentration of contaminating components, mg/l					
	После отстаивания / After the settlement			После отстаивания / After the settlement		
	Взвешенные вещества / Suspended matter	Нефте- продукты / Oil products	Азот аммонийных солей / Nitrogen of ammonium salts	Взвешенные вещества / Suspended matter	Нефте- продукты / Oil products	Азот аммонийных солей / Nitrogen of ammonium salts
10	40,72	4,97	0,85	30,43	—	0,32
11	8,18	3,12	5,3	7,13	0,3*	1,75
12	8,39	4,34	4,89	5,95	2,98	1,39
13	4,12	1,23	1,76	10,32	—	1
14	31,57	3,62	3,84	18,63	0,76	1,34
15	17,35	1,1	0,39	1,76	0,38	—
16	14,36	0,89	0,84	1,52	0,3	0,3
17	11,14	0,97	0,79	1,67	0,31	0,3

Примечание: * — предел обнаружения весовым методом; ** — анализы не проводились.

Note: * — weight method detection limit; ** — no tests performed.

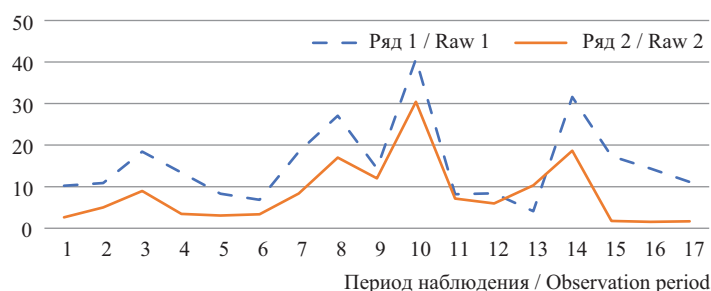


Рис. 4. Изменение концентрации взвешенных веществ, мг/л, в ходе эксплуатации очистных сооружений: ряд 1 — после отстойника; ряд 2 — на выходе

Fig. 4. Change in concentration of suspended matter: mg/l in the course of operation of treatment facilities: Raw 1 — before the settling basin; Raw 2 — at the outlet

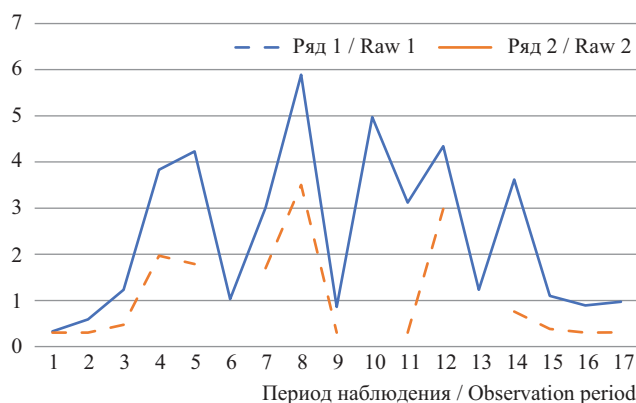


Рис. 5. Изменение концентрации нефтепродуктов, мг/л, в ходе эксплуатации очистных сооружений: ряд 1 — после отстойника; ряд 2 — на выходе

Fig. 5. Change in concentration of oil products: mg/l in the course of operation of treatment facilities: Raw 1 — before the settling basin; Raw 2 — at the outlet

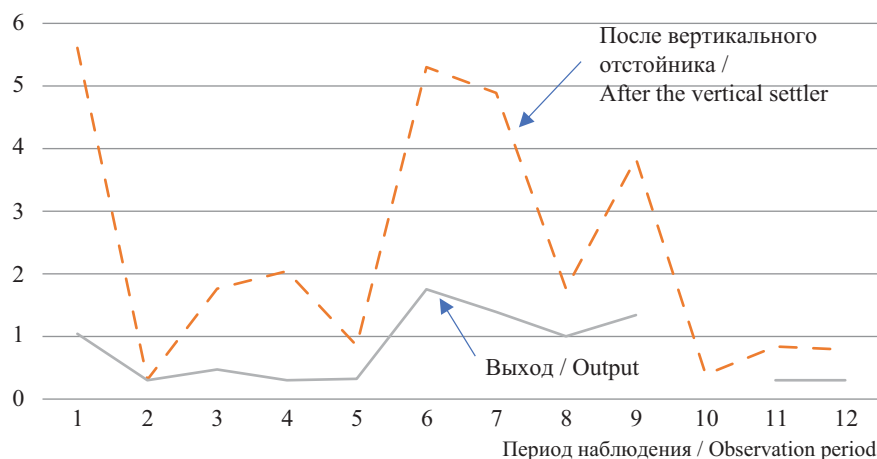


Рис. 6. Изменение концентрации азота аммонийных солей, мг/л, в ходе эксплуатации очистных сооружений

Fig. 6. Change in concentration of nitrogen of ammonium salts: mg/l in the course of operation of treatment facilities

В итоге изучения нитрогеназной активности была установлена способность бактериальных штаммов ассимилировать атмосферный азот.

На основе наиболее активных азотфиксирующих нефтеокисляющих культур: *Rhodococcus erythropolis*, *Pseudomonas fluorescens*, *Arthrobacter tumescens*, *Pseudomonas rathonis*, *Azotobacter chroococcum*, создан биопрепарат с условным названием «А1», предназначенный для разложения нефти и ее компонентов на производные в водной среде.

Выявлена способность выделенных культур нефтеокисляющих бактерий использовать углеводороды в условиях ассимиляции атмосферного азота, причем, эффект этот значительно выше при применении ассоциаций микроорганизмов-деструкторов.

В условиях периодического культивирования исследованы деструктивные свойства ассоциации. Результаты показали, что на седьмые сутки культивирования деструкция парафиновых углеводородов

у сред без азота составляет 68 %, тогда как в присутствии аммонийного азота она достигала 87 %.

Биопрепарат «А1» с успехом применен для очистки нефтесодержащих сточных вод ОАО «Автодеталь». Концентрация нефтепродуктов в очищенной воде после биобашни, оборудованной волокнистой загрузкой с биопрепаратом «А1», составляла в период запуска станции и проведения пусконаладочных работ 0,5–15 мг/л, а в период эксплуатации станции — 0,3–3,5 мг/дм³, что с учетом разбавления общезаводскими стоками при нормальном режиме существенно ниже норм ПДК для сброса в канализационную сеть. Анализ работы реконструированных и оснащенных волокнистым носителем очистных сооружений ливневых вод показал, что эффективность процесса составила, %, по:

- взвешенным веществам — 99,7;
- нефтепродуктам — 98,3;
- ХПК — 89,2;
- азоту аммонийных солей — 77,9;
- фосфору минеральному — 53,3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суржко Л.Ф., Финкельштейн З.И., Баскунов Б.П. и др. Утилизация нефти в почве и воде микробными клетками // Микробиология. 1995. Т. 64. № 3. С. 393–398.
2. Тимергазина И.Ф., Переходова Л.С. К проблеме биологического окисления нефти и нефтепродуктов углеводородокисляющими микроорганизмами // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Т. 7. № 1. С. 15.
3. Морозова К.М. Принципы расчета систем биологической очистки сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2009. № 1. С. 26–31.
4. Солкина О.С. Очистка сточных вод предприятий молочной промышленности: автореф. дисс. ... на соиск. канд. техн. наук. Самара, 2017. 23 с.
5. Lovley D.R., Lonergan D.J. Anaerobic Oxidation of Toluene, Phenol, and p-Cresol by the Dissimilatory Iron-Reducing Organism, GS-15 // Applied and Environmental Microbiology. 1990. Vol. 56. Issue 6. Pp. 1858–1864. DOI: 10.1128/aem.56.6.1858-1864.1990
6. Арустамов Э.А., Левакова И.В., Баркалова Н.В. Экологические основы природопользования: учебник для вузов. М. : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2003. 280 с.

7. Степанов С.В., Стрелков А.К., Солкина О.С. Расчет аэротенков для очистки городских сточных вод от биогенных элементов: метод. указания. Самара : СГАСУ, 2015. 34 с.

8. Суржко Л.Ф., Финкельштейн З.И., Баскунов Б.П. и др. Утилизация нефти в почве и воде микробными клетками // Микробиология. 1995. № 3. С. 393–398.

9. Ракицкий Д.С., Егорова Ю.А., Левин Д.И., Гордеев С.А., Нагорный С.Л., Баженов В.И. и др. Энергоэффективный принцип реконструкции воздухоудв. станции городских очистных канализационных сооружений Самары // Водоснабжение и санитарная техника. 2016. № 8. С. 52–62.

10. Смирнов В.Б., Шевченко Н.П. Использование аэротенков в режиме продленной аэрации для повышения эффективности очистки сточных вод // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2015. № 3 (159). С. 42–45.

11. Prosser J.I., Hink L., Gubry-Rangin C., Nicol G.W. Nitrous oxide production by ammonia oxidizers: Physiological diversity, niche differentiation and potential mitigation strategies // Global Change Biology. 2020. Vol. 26. Issue 1. Pp. 103–118. DOI: 10.1111/gcb.14877

12. Ghosal D., Ghosh S., Dutta T.K., Ahn Y. Current State of Knowledge in Microbial Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A Review // Frontiers in Microbiology. 2016. Vol. 7. DOI: 10.3389/fmicb.2016.01369

13. Иваненко И.И. Редокс-последовательность при дыхании бактерий // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 3 (62). С. 155–159. DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-3-155-159

14. Иваненко И.И., Новикова А.М., Духовской В.Д. Элементы с переменной степенью окисления при микробном окислении органических загрязнений воды // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 2 (78). С. 24–31. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.2.24-31

15. Мешенгиссер Ю.М., Щетинин А.И., Есин М.А. Удаление азота и фосфора активным илом // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2009. № 2 (14). С. 29–34.

16. Дубовик О.С., Маркевич Р.М. Совершенствование биотехнологий удаления азота и фосфо-

ра из городских сточных вод // Труды БГТУ. № 4. Химия, технология органических веществ и биотехнология. 2016. № 4 (186). С. 232–237.

17. Камалов Р.Т., Кульков В.Н. Интенсификация биологической очистки иммобилизованным активным илом // Молодежный вестник ИрГТУ. 2017. № 1. С. 9.

18. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю., Сосна В.М. Регенерация синтетической загрузки в биореакторе // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 1 (649). С. 92–100.

19. Григорьева Т.В. Роль азотфиксирующих микроорганизмов в фиторемедиации промышленных углеводородных шламов: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Казань : Казанский государственный университет В.И. Ульянова-Ленина, 2009. 23 с.

20. Клямар О.В., Сорока Я.М., Гвоздяк П.И. Селекция ассоциации азотфиксирующих углеводородокисляющих микроорганизмов // Химия и технология воды. 1998. Т. 20. № 3. С. 325–329.

21. Клямар О.В., Самойленко Л.С., Нагорная С.С., Гвоздяк П.И. Азотфиксирующие микроорганизмы — деструкторы нефтепродуктов // Химия и технология воды. 2002. Т. 24. № 3. С. 271–282.

22. Леффлер У.Л. Переработка нефти. М. : Олимп-Бизнес, 2005. 223 с.

23. Квасников Е.И., Писарчук Е.Н. Артробактер в природе и производстве. Киев : Наукова думка, 1980. 219 с.

24. Смирнов В.В., Киприанова Е.А. Бактерии рода *Pseudomonas*. Киев : Наукова думка, 1990. 264 с.

25. Hardy R.W.F., Holsten R.D., Jackson E.K., Burns R.C. The Acetylene-Ethylene Assay for N₂ Fixation: Laboratory and Field Evaluation // Plant Physiology. 1968. Vol. 43. Issue 8. Pp. 1185–1207. DOI: 10.1104/pp.43.8.1185

26. Pagan J.D., Child J.J., Scowcroft W.R., Gibson A.H. Nitrogen fixation by *Rhizobium* cultured on a defined medium // Nature. 1975. Vol. 256. Issue 5516. Pp. 406–407. DOI: 10.1038/256406a0

27. Lowry O.H., Rosebrough N.J., Farr A.L., Randall R.J. Protein measurement with the Folin phenol reagent // J. Biol. Chem. 1951. Vol. 193. Pp. 265–275.

Поступила в редакцию 15 мая 2020 г.

Принята в доработанном виде 9 июня 2020 г.

Одобрена для публикации 30 июня 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Ирина Ивановна Иваненко — кандидат технических наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 3; i5657@mail.ru;

Елена Яковлевна Лапатина — химик-микробиолог; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 3; i5657@mail.ru;

Павел Иванович Смирнов — технический директор — главный инженер; Автодеталь; 192012, Санкт-Петербург, пр-т Обуховской обороны, д. 120, оф. 234; smirnovpi54@yandex.ru.

REFERENCES

1. Surzhko L.F., Finkelstein Z.I., Baskunov B.P. et al. Utilization of oil in soil and water by microbial cells. *Microbiology*. 1995; 64(3):393-398. (rus.).
2. Timergazina I.F., Perekhodova L.S. Biological oxidation of oil and petroleum products using hydrocarbon-oxidizing microorganisms. *Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies*. 2012; 7(1):15. (rus.).
3. Morozova K.M. Principles of calculation of biological wastewater treatment systems. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2009; 1:26-31. (rus.).
4. Solkina O.S. *Waste water treatment of dairy enterprises: abstract of the dissertation for the cand. tech. sciences*. Samara, 2017; 23. (rus.).
5. Lovley D.R., Lonergan D.J. Anaerobic Oxidation of Toluene, Phenol, and p-Cresol by the Dissimilatory Iron-Reducing Organism, GS-15. *Applied and Environmental Microbiology*. 1990; 56(6):1858-1864. DOI: 10.1128/aem.56.6.1858-1864.1990
6. Arustamov E.A., Levakova I.V., Barkalova N.V. *Environmental fundamentals of environmental management: textbook for universities*. Moscow, Dashkov and K° Publishing and Trading Corporation, 2003; 280. (rus.).
7. Stepanov S.V., Strelkov A.K., Solkina O.S. *Calculation of aerotenks for the treatment of urban wastewater from biogenic elements: Methodological guidelines*. Samara, SGASU, 2015; 34. (rus.).
8. Surzhko L.F., Finkelstein Z.I., Baskunov B.P. et al. Oil utilization in soil and water by microbial cells. *Microbiology*. 1995; 3:393-398. (rus.).
9. Rakitskii D.S., Egorova I.A., Levin D.I., Gordeev S.A., Nagornyi S.L., Bazhenov V.I. Energy-efficient principle of upgrading the air blower house at the samara municipal wastewater treatment facilities. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2016; 8:52-62. (rus.).
10. Smirnov V.B., Shevchenko N.P. Use of aerotenks in the mode of extended aeration to increase the efficiency of wastewater treatment. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2015; 3(159):42-45. (rus.).
11. Prosser J.I., Hink L., Gubry-Rangin C., Nicol G.W. Nitrous oxide production by ammonia oxidizers: Physiological diversity, niche differentiation and potential mitigation strategies. *Global Change Biology*. 2020; 26(1):103-118. DOI: 10.1111/gcb.14877
12. Ghosal D., Ghosh S., Dutta T.K., Ahn Y. Current State of Knowledge in Microbial Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A Review. *Frontiers in Microbiology*. 2016; 7. DOI: 10.3389/fmicb.2016.01369
13. Ivanenko I.I. Redox-sequence at bacterial respiration. *Bulletin of Civil Engineers*. 2017; 3(62):155-159. DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-3-155-159 (rus.).
14. Ivanenko I.I., Novikova A.M., Dukhovskoi V.D. Variable oxidation elements in microbial oxidation of organic water pollution. *Water and Ecology*. 2019; 2(78):24-31. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.2.24-31 (rus.).
15. Meshengisser Yu.M., Shchetinin A.I., Esin M.A. Removal of nitrogen and phosphorus with active sludge. *Water purification. Water preparation. Water supply*. 2009; 2(14):29-34. (rus.).
16. Dubovik O.S., Markevich R.M. Improvement of biotechnology of nitrogen and phosphorus removal from urban wastewater. *Proceedings of BSTU. No. 4. Chemistry, technology of organic substances and biotechnology*. 2016; 4(186):232-237 (rus.).
17. Kamalov R., Kulkov V. Biological treatment intensification by immobilized activated sludge. *ISTU Bulletin of Youth*. 2017; 1:9-14. (rus.).
18. Kulkov V.N., Soloponov E.Y., Sosna V.M. Regeneration of synthetic download in bioreactors. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2013; 1(649):92-100. (rus.).
19. Grigorieva T.V. *The role of nitrogen-fixing microorganisms in the phytoremediation of industrial hydrocarbon sludges: abstract of the dissertation for the cand. biol. sciences*. Kazan, Kazan State University V.I. Ulyanov-Lenin, 2009; 23. (rus.).
20. Klyamar O.V., Soroka Y.M., Nail P.I. Selection of an association of nitrogen-fixing hydrocarbon-oxidizing microorganisms. *Chemistry and Water Technology*. 1998; 20(3):325-329. (rus.).
21. Klyamar O.V., Samoilenko L.S., Nagornaya S.S., Nvozdya P.I. Nitrogen-fixing microorganisms — destructors of petroleum products. *Chemistry and Water Technology*. 2002; 24(3):271-282. (rus.).
22. Leffler W.L. *Oil refining*. Moscow, Olympus-Business, 2005; 223. (rus.).

23. Kvasnikov E.J., Pisarchuk E.N. *Arthrobacter in nature and production*. Kiev, Naukova Duma, 1980; 219. (rus.).
24. Smirnov V.V., Kiprianova E.A. *Bacteria of the genus Pseudomonas*. Kiev, Naukova dumka, 1990; 264. (rus.).
25. Hardy R.W.F., Holsten R.D., Jackson E.K., Burns R.C. The Acetylene-Ethylene Assay for N₂ Fixation: Laboratory and Field Evaluation. *Plant Physiology*. 1968; 43(8):1185-1207. DOI: 10.1104/pp.43.8.1185
26. Pagan J.D., Child J.J., Scowcroft W.R., Gibson A.H. Nitrogen fixation by Rhizobium cultured on a defined medium. *Nature*. 1975; 256(5516):406-407. DOI: 10.1038/256406a0
27. Lowry O.H., Rosebrough N.J., Farr A.L., Randall R.J. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J. Biol. Chem.* 1951; 193:265-275.

Received May 15, 2019

Adopted in a revised form on June 9, 2020.

Approved for publication June 30, 2020

B I O N O T E S: **Irina I. Ivanenko** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeiskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; i5657@mail.ru;

Elena Ya. Lapatina — chemist-microbiologist; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeiskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; i5657@mail.ru;

Pavel I. Smirnov — technical director-chief engineer; **AvtoDetail**; office 234, 120 Obukhovskoy oborony avenue, Saint Petersburg, 192012, Russian Federation; smirnovpi54@yandex.ru.

Строительство, конструкции и инновации плотин из малоцементного бетона

Н.А. Анискин, А.М. Шайтанов

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из наиболее часто применяемых типов водоподпорных сооружений в современном гидротехническом строительстве являются плотины из малоцементного бетона. Число сооружений подобного типа возрастает с каждым годом вследствие простоты конструкции, высокой скорости строительства и экономической эффективности. Однако при возведении и эксплуатации подобных сооружений может возникнуть ряд проблем. В частности, проблемой может стать пониженная прочность и водопроницаемость межслойных швов. Температурные воздействия строительного и эксплуатационного периодов могут вызвать дополнительные деформации сооружения, изменения его напряженно-деформированного состояния, раскрытие существующих трещин и возникновение новых. Изучение опыта проектирования, строительства и эксплуатации плотин из малоцементного бетона позволит создать основу для дальнейшего совершенствования подобных конструкций, развития методов по устранению их недостатков. Также это даст возможность расширить наши представления о работе конструкции в различных условиях, в том числе климатических.

Материалы и методы. Собраны и проанализированы данные мониторинга существующих плотин из малоцементного бетона, научные статьи, технические отчеты и материалы конференций, в том числе Международной комиссии по большим плотинам (ICOLD).

Результаты. Выполнен сравнительный анализ конструкций уже построенных плотин и перспективных решений. Показана необходимость комплексного подхода к решению проблем с температурным трещинообразованием фильтрацией через тело плотины.

Выводы. Результаты работы могут быть использованы в качестве основы для дальнейших детальных исследований. Сравнительный анализ традиционных и инновационных противофильтрационных элементов позволит более эффективно выбирать решение по защите напорной грани сооружения. Для решения вопроса температурного трещинообразования возможно развитие прогнозных методик и на их основе выработка рекомендаций по снижению негативного воздействия температуры на работу сооружения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: малоцементный бетон, плотина, температурное трещинообразование, противофильтрационный элемент, геокомпозит, фильтрация, расчетная методика

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Анискин Н.А., Шайтанов А.М. Строительство, конструкции и инновации плотин из малоцементного бетона // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 7. С. 1018–1029. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.1018-1029

Low-cement concrete dams: construction, structures and innovations

Nikolai A. Aniskin, Alexey M. Shaytanov

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Low-cement concrete dams are water-retaining structures frequently used in modern hydraulic engineering. The number of facilities of this type goes up every year due to their simple design, speedy construction and high economic efficiency. However, a number of problems may arise in the construction and operation of such facilities. In particular, reduced strength and water permeability of interlayer joints may constitute a problem. Temperature effects arising in the course of construction and operation may cause additional deformation of their structure, changes in their stress-strain state, opening of existing cracks and further cracking. The study of the design experience, building and operation of dams made of low-cement concrete will lay the groundwork for the development of similar structures and defect elimination methods. It will also provide an opportunity to learn more about the behaviour of structures exposed to various conditions, including climatic ones.

Materials and methods. Data on existing dams made of low-cement concrete, research articles, technical reports and conference proceedings, including those issued by the International Commission on Large Dams (ICOLD), have been collected and analyzed.

Results. The comparative analysis of designs of dams in operation and future-oriented solutions is performed. The co-authors have demonstrated the need for an integrated approach to solving temperature cracking problems by using filtration through the dam body.

Conclusions. The results can be used as the basis for further detailed studies. The comparative analysis of traditional and innovative waterproofing liners will help to effectively choose the protection solution for an upstream face of a facility. New forecasting methods and recommendations aimed at the reduction of negative temperature effects on the operation of facilities can solve the temperature cracking problem.

KEYWORDS: low cement concrete, dam, temperature cracking, waterproofing liner, geocomposite, filtration, method of analysis

FOR CITATION: Aniskin N.A., Shaytanov A.M. Low-cement concrete dams: construction, structures and innovations. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(7):1018-1029. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.1018-1029 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Малоцементные бетоны стали применяться в плотностроении с 70-х годов XX в. В настоящее время плотины из малоцементного бетона получили широкое распространение при реализации проектов по всему миру из-за высокой интенсивности бетонных работ благодаря существенному сокращению сроков строительства и снижению его стоимости¹ [1, 2]. Плотины могут достигать величин в интервале 20–50 % в зависимости от условий района строительства² [3, 4]. Так, например, при строительстве плотины Оливенхайн в США (высота 97 м, объем бетона тела плотины — 1140 тыс. м³) максимальная интенсивность бетонных работ составила 12 250 м³/сут, а срок возведения — 12 мес. (рис. 1).

Такие показатели достигаются за счет послойной и непрерывной укладки бетонной смеси с последующим ее уплотнением виброкатками или самосвалами. Благодаря высокой эффективности указанной технологии по состоянию на 2019 г.

в мире построено 828 плотин данного типа высотой 15 м и более. Из малоцементного бетона возводятся плотины любой конструкции: гравитационные, контрфорсные, арочные. Перспективным направлением является строительство полупроницаемых плотин из особо тощего малоцементного бетона трапециoidalного профиля [2, 5, 6].

Однако сооружения такого типа испытывают целый ряд проблем, связанных с фильтрацией³ [7, 8]. Из-за того, что толщина слоев при укладке составляет от 0,3 до 1,0 м, образуется большое количество горизонтальных межслойных швов, которые являются потенциальными путями фильтрации [9]. Несмотря на низкое содержание цемента (его расход варьируется от 60 до 150 кг/м³), проблема температурного трещинообразования также актуальна [10, 11]. В связи с этим требуется устройство дополнительного противофильтрационного элемента на напорной грани и мероприятия по снижению возможного температурного трещинообразования [12–15].

Цель исследования — обзор и анализ мирового опыта строительства плотин из малоцементного бетона, различных типов их конструкций и мер

³ ICOLD Bulletin 135 «Geomembrane sealing systems for dams». 2010.



Рис. 1. Плотина из укатанного бетона Оливенхайн, США, 2004

Fig. 1. Roller-compacted concrete dam, Olivenhain, USA, 2004

по борьбе с фильтрацией и температурным трещинообразованием [16–18].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения поставленной задачи было изучено большое количество различных материалов, а именно: актуальные статьи, опубликованные в журналах Scopus/Web of Science [4–6, 7–11, 13–18], данные мониторинга уже построенных плотин и технические отчеты по ним¹ [2, 3, 12]. Также использовались материалы рабочей группы по разработке Бюллетеня ICOLD, посвященного плотинам из малоцементного бетона, и Бюллетеня ICOLD 135 (Геомембранные противофильтрационные системы для плотин)¹ [26]. На основании полученной информации выполнен обзор мирового опыта по строительству и эксплуатации таких сооружений и произведен сравнительный анализ применяемых решений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Идея применения малоцементного бетона при строительстве гравитационных плотин предложена в 1960 г. в рамках дискуссии Международной комиссии по большим плотинам. В 1961 г. состоялось первое применение технологии на перемычке плотины Шихмен на о. Тайвань, где из малоцементного бетона было выполнено центральное ядро. В 1970 г. в США на плотине Тимс Форд возведена полноразмерная опытная секция, а уже в 1983 г. за 5,5 месяцев построена плотина Уиллоу Крик (высота — 52 м, объем бетона тела плотины — 333 тыс. м³).

Самая крупная и самая высокая в мире плотина из малоцементного бетона находится в Японии. Это — плотина Тамагава (1987 г.) высотой 100 м. Объем уложенного укатанного бетона — 1 млн 150 тыс. м³.

В СССР исследования малоцементных бетонов и технологии их послойной укладки осуществлялись с начала 1970-х гг. В результате были возведены плотины Таш-Кумырской ГЭС (рис. 2) на р. Нарын в Киргизии высотой 75 м и длиной по гребню 320 м (объем уложенного малоцементного бетона — 100 тыс. м³), Бухтарминской ГЭС на р. Иртыш в Казахстане высотой 90 м, длиной по гребню 450 м (объем уложенного малоцементного бетона — 587 тыс. м³), Бурейской ГЭС на р. Бурей высотой 139 м и длиной по гребню 810 м (объем уложенного малоцементного бетона — 587 тыс. м³), а также отдельные сооружения или опытные участки на Курпсайском, Курейском, Саяно-Шушенском гидроузлах.

По проектам, разработанным АО «Институт Гидропроект» (г. Москва), построены плотины ГЭС Капанда в Анголе и Шонла во Вьетнаме.

В Китае активное развитие технологии началось с 1986 г. По состоянию на 2019 г. завершено возведение 45 плотин, еще 17 находятся в стадии строительства, включая 5 плотин высотой более 100 м. Первый гидроузел — Кенжу (1986, объем уложенного малоцементного бетона — 43 тыс. м³). В Китае находится самая высокая плотина из малоцементного бетона в мире — Лунтань высотой 217 м (объем уложенного малоцементного бетона — 4,95 млн м³), а также перемычка высотой 121 м (объем уложенного малоцементного бетона — 1,1 млн м³).

Основным преимуществом плотин подобного типа является то, что они сочетают в себе высокие

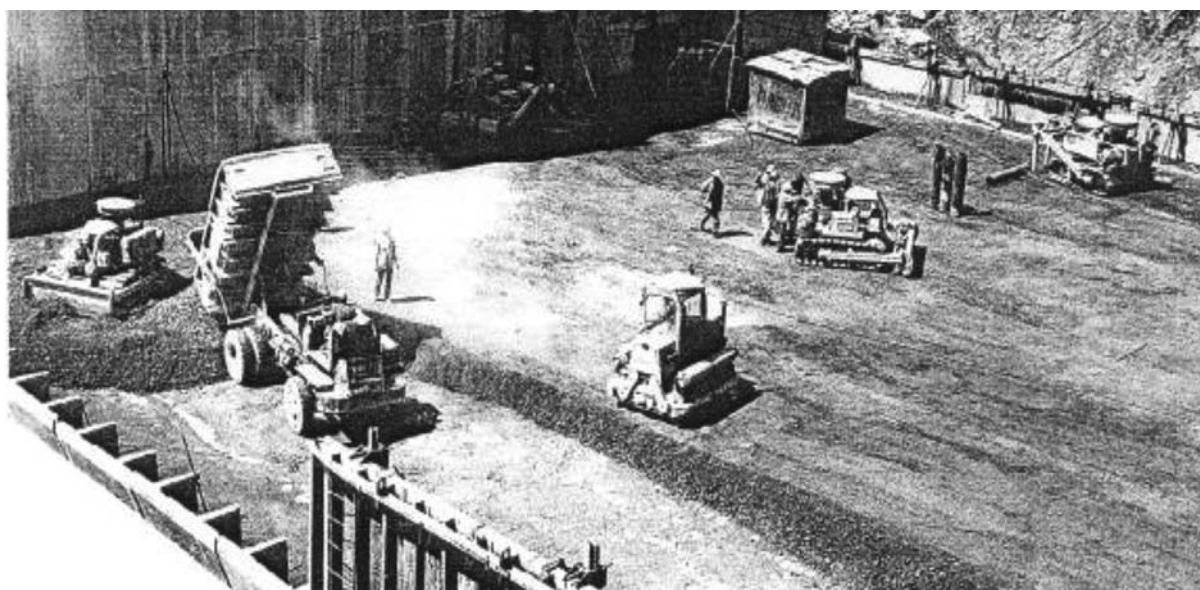


Рис. 2. Укладка малоцементного бетона в тело плотины Таш-Кумырской ГЭС, Киргизия, 1985

Fig. 2. Low-cement concreting of the dam body, Tash-Kumyr hydraulic power plant, Kyrgyzstan, 1985

темпы строительства и экономичность грунтовых плотин, а также эксплуатационную надежность бетонных плотин. Малоцементная смесь укладывается длинными и непрерывными слоями, после чего уплотняется самосвалами, тракторами или виброкатками. Как известно, вибрированный бетон заливается изолированными блоками ограниченных размеров и уплотняется глубинными вибраторами. Применение укатанного бетона позволяет обеспечить непрерывность производства работ, сократить сроки возведения сооружения и сэкономить существенное количество цемента. Кроме того, при устройстве блоков бетонирования из вибрированного бетона часто для предотвращения чрезмерного экзотермического разогрева необходимо предусматривать трубчатую систему охлаждения. Это — достаточно сложно и дорого. Также при возведении плотин из вибрированного бетона необходимо устраивать температурно-осадочные швы между блоками, которые затем следует зацементировать.

Все вышеперечисленные факторы и определяют стабильный рост числа плотин из малоцементного бетона по всему миру в настоящее время.

Как известно, малоцементный бетон представляет собой особо жесткую бетонную смесь с нулевой осадкой конуса, которая не подвержена значительным усадкам под весом виброкатка, самосвала или прочей техники, используемой для ее уплотнения. Свойства смеси дают возможность доставлять ее на площадку строительства любым видом транспорта (в основном самосвалами), который может двигаться непосредственно по поверхности блока бетонирования и заезжать с помощью пандусов на более высокие уровни, предварительно нарезанные в уже уложенных слоях.

В зависимости от количества содержащегося цемента малоцементные бетоны могут быть разделены на четыре основных типа:

- особо тощие (содержание цемента 60–100 кг/м³);
- японского типа (Roller-compacted concrete dam — RCD при содержании цемента 120–130 кг/м³);
- умеренно-пластинчатые (100–150 кг/м³);
- пластинчатые (150 кг/м³ и выше).

В Японии был разработан свой тип укатанного бетона (RCD). В табл. 1 представлено сравнение состава RCD плотины Тамагава, Японии (расход цемента — 91 кг/м³, золы уноса — 39 кг/м³) с традиционным вибрированным бетоном.

Строительство гравитационных плотин из малоцементного бетона допустимо при наличии скального основания, подходящего также для аналогичных по конструкции плотин из вибрированного бетона. Плотины такого типа экономически целесообразно возводить в широких створах, особенно по сравнению с грунтовыми плотинами, которым необходим отдельный водосброс. Экономическая эффективность возрастает с увеличением масштаба сооружения.

Использование самосвалов, тракторов или виброкатков для уплотнения уложенного бетона вместо глубинных вибраторов не влияет на базовые принципы проектирования плотин, шлюзов и прочих массивных сооружений. Однако в процессе разработки проекта производства работ необходимо учитывать возможную высокую интенсивность бетонных работ.

Как известно, гравитационные плотины проектируются, основываясь на двух основополагающих факторах: отсутствие растягивающих напряжений на напорной грани в контакте с основанием и устойчивость против сдвига по основанию.

Табл. 1. Сравнение состава RCD плотины Тамагава с вибрированным бетоном

Table 1. Comparison of Tamagawa Dam RCD Composition with Vibrated Concrete

Параметр сравнения / Comparison parameter	Вибрированный бетон / Vibrated Concrete	RCD плотины Тамагава / RCD of Tamagawa Dam
Максимальная фракция крупного заполнителя, мм / Maximum coarse aggregate fraction, mm	150	150
Осадка конуса, см / Cone slump, cm	4 ± 1	0
Водоцементное соотношение (включая минеральные добавки), % / Water-cement ratio (including mineral additives), %	68	73
Отношение объемов мелкого (песка) и крупного заполнителя, % / Volume ratio of fine (sand) and coarse aggregates, %	25	30
Состав единицы объема / Composition of volume unit		
Вода, кг/м ³ / Water, kg/m ³	115	95
Цемент + добавки, кг/м ³ / Cement + additives, kg/m ³	170	130
Мелкий заполнитель, кг/м ³ / Fine aggregate, kg/m ³	520	657
Крупный заполнитель, кг/м ³ / Coarse aggregate, kg/m ³	1570	1544

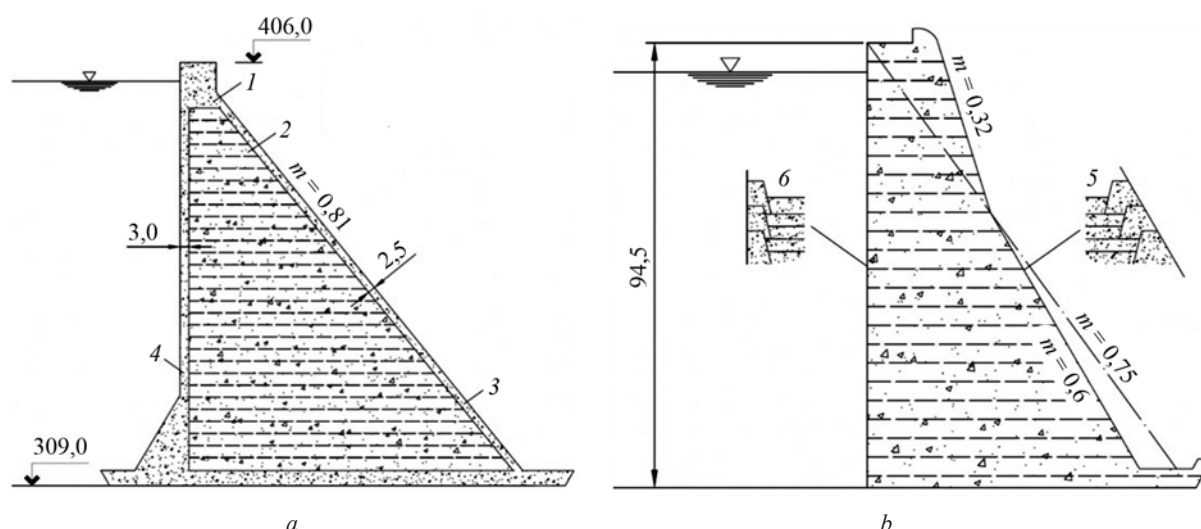


Рис. 3. Конструкции плотин из малцементного бетона: *a* — глухая секция плотины Тамагава 1-го типа, Япония; *b* — водосливная секция плотины Аппер Стилуотер 2-го типа, США; 1 — вибрированный бетон (зона у гребня); 2 — малцементный бетон внутренней зоны; 3 — вибрированный бетон (низовая грань); 4 — вибрированный бетон (напорная грань); 5 — конструкция облицовки низовой грани; 6 — конструкция облицовки напорной грани

Fig. 3. Designs of low-cement concrete dams: *a* — nonoverflow section of Tamagawa dam of the 1st type, Japan; *b* — rollway of the Upper Stillwater dam of the 2nd type, USA; 1 — vibrated concrete (the area close to the crest); 2 — low-cement concrete of the inner zone; 3 — vibrated concrete (downstream face); 4 — vibrated concrete (upstream face); 5 — design of the facing of the downstream face; 6 — design of the facing of the upstream face

Помимо указанных выше условий, при проектировании сооружений из малцементного бетона требуется также учитывать прочность на сдвиг между слоями (толщина слоев может варьироваться в пределах от 0,3 до 1,0 м).

Прочность на сдвиг на контакте слоев ниже, чем в массиве малцементного бетона. Чтобы снизить этот отрицательный эффект, следует сокращать время между укладкой последующего слоя и применять цементный раствор для улучшения межслойной адгезии. Возможно увеличение содержания вяжущего в смеси, что снижает экономический эффект таких плотин. При проектировании плотин из особо тощего бетона сцепление между слоями принимают равным 0. В данном случае слои удерживаются только за счет силы трения.

Устойчивость на опрокидывание для плотин из малцементного бетона рассчитывается так же, как и для плотин из традиционного вибрированного бетона.

Заложение низового откоса плотин из малцементного бетона может изменяться в пределах от 0,6 до 0,8. В зависимости от конструкции гравитационные плотины из малцементного бетона можно подразделить на следующие 4 типа:

- плотины с центральной частью из малцементного бетона с оболочкой из вибрированного бетона (рис. 3, *a*);
- плотины, полностью возведенные из малцементного бетона (обязательно зонирование и правильный подбор марок и классов бетона — возможно

использование бетона с повышенным содержанием цемента во внешних зонах) (рис. 3, *b*);

- плотины из малцементного бетона с противифльтрационным экраном на напорной грани;
- плотины трапециевидного сечения из особо тощего малцементного бетона, частично проницаемые, с противифльтрационным экраном на напорной грани.

В качестве примера первого варианта на рис. 3, *a* представлено поперечное сечение японской плотины Тамагава. При такой конструкции внешняя оболочка может возводиться в виде опережающей стенки со стороны верхнего бьефа.

Преимуществом конструкции подобного типа является возможность производства работ и летом, и зимой. Недостаток — необходимость устройства шва между опережающей стенкой и низовой гранью.

Плотины, полностью возведенные из малцементного бетона, приведены на рис. 3. На рис. 3, *b* представлено поперечное сечение водосливной секции плотины Аппер Стилуотер (США). Такие плотины являются наиболее простым типом подобной конструкции, однако для данного типа часто характерна серьезная фильтрация через швы между уложенными слоями малцементного бетона. При строительстве плотин этого типа необходимо принимать дополнительные меры по обеспечению их водонепроницаемости, например, повысить содержание вяжущего в слоях со стороны напорной грани. Эффективность подобного решения подтверждена опытом его применения на плотинах в США.

Практика современного плотиностроения показывает, что варианты 3 и 4, когда предусматривается устройство противофильтрационных экранов на напорной грани плотины, — особенно надежные и технологичные, а также экономически оправданные.

Как было указано выше, малоцементный бетон — не однородный материал. Вследствие технологии укладки бетона в тело плотины возникает неравномерность его свойств, что стоит учитывать в процессе эксплуатации. Межслойные швы без дополнительных добавок цементного вяжущего служат зонами пониженной плотности и повышенной водопроницаемости. Межслойные швы в плотинах из укатанного бетона с высоким содержанием цемента обладают меньшей водопроницаемостью. В этом случае повышается риск неконтролируемой фильтрации по температурным трещинам, возникшим вследствие увеличившейся экзотермии цемента. Кроме того, при строительстве таких плотин необходим строгий контроль за температурой малоцементной смеси при изготовлении и укладке (в некоторых случаях смеси может потребоваться охлаждение), а также обеспечение гидроизоляции горизонтальных швов.

Все эти мероприятия требуются для того, чтобы исключить возможное выщелачивание цемента и последующее разрушение бетона. Авария, произошедшая в 2004 г. на плотине Камара в Бразилии спустя 2 года после окончания строительства, подтверждает опасность фильтрации, которая может повлечь за собой потерю устойчивости сооружения.

Таким образом, очевидна необходимость устройства независимого противофильтрационного элемента на напорной грани.

В зависимости от типа, противофильтрационные облицовки напорной грани можно разделить на две следующие группы:

- бетонные — из армированного или неармированного вибрированного бетона, укатанного бетона с повышенным содержанием цемента, сборного железобетона и др.;

- синтетические (открытого или закрытого типа).

Чтобы эффективно противостоять фильтрации, бетонные и железобетонные экраны должны быть достаточно толстыми, а все швы загерметизированы. Облицовки такого типа подвержены температурному трещинообразованию, обладают низкой сейсмостойкостью и не создают однородного защитного покрытия напорной грани. Также периодически они требуют ремонта.

Кроме того, устройство бетонных противофильтрационных экранов увеличивает сроки и стоимость строительства сооружения и его дальнейшей эксплуатации, что противоречит основной идее строительства плотин из малоцементного бетона.

На рис. 4 показаны низовые грани плотин с бетонными противофильтрационными элементами различных типов. На рис. 4, а продемонстрирована низовая грань плотины Аппер Стилуотер, США. Конструкция облицовки по напорной грани плотины выполнена из ступенчатых блоков. На рис. 4, б приведена низовая грань плотины Миэль I, Колумбия. В этом случае по напорной грани выполнена опережающая стенка из укатанного бетона с повышенным содержанием цемента. В обоих случаях наблюдается высачивание фильтрующей воды на низовую грань плотины, что говорит о недостаточно хорошей гидроизоляции.

Современной альтернативой бетонных и железобетонных экранов напорной грани плотины являются синтетические покрытия. Синтетические геокомпозитные системы (например, SIBELON®, производитель — компания Carpi Tech SA, Швейцария) могут устанавливаться как после завершения



а



б

Рис. 4. Низовые грани плотин: а — Аппер Стилуотер, США, 1987; б — Миэль I, Колумбия, 2002

Fig. 4. Downstream faces of dams: а — Upper Stillwater dam, USA, 1987; б — Miel I, Columbia, 2002

строительства плотины, так и во время ее возведения для обеспечения гидроизоляции уже готовых секций плотины.

Основное преимущество таких систем — в том, что они позволяют решить проблему гидроизоляции межслойных швов и напорной грани в целом, что приводит к снижению требований к бетонной смеси и экономии цемента. Монтаж производится в короткие сроки отдельными бригадами без пересечений с процессом укладки слоев малоцементного бетона.

Геокомпозит состоит из геомембраны толщиной от 1,5 до 5 мм, термосваренной в процессе производства с геотекстилем поверхностной плотностью от 200 до 800 г/м². Материал практически водонепроницаем ($k_{\phi} \leq 6,25 \cdot 10^{-12}$ м/с), не имеет швов и обладает высокой способностью к растяжению. Максимальное удлинение при разрыве геомембраны ≥ 250 % без потери свойств, позволяющее перекрывать образующиеся трещины.

Геокомпозит стоек к химическим, биологическим и атмосферным воздействиям, не теряет своих свойств под влиянием ультрафиолета. Сварка листов возможна в диапазоне температур от -30 до 60 °С.

На рис. 5 представлены схемы открытой (рис. 5, а) и закрытой (рис. 5, б) геокомпозитных систем для устройства водонепроницаемого экрана напорной грани.

Срок службы открытой системы составляет более 50 лет, закрытой — не ограничен (по данным производителя).

Закрытые системы обеспечивают постоянную защиту геокомпозита от возможных повреждений в процессе эксплуатации. Однако такие системы требуют очень строгого контроля качества производства работ. После того как система смонтирована, ее мониторинг и ремонт практически невозможны.

В то же время открытая система позволяет производить мониторинг в любое время, включая подводные обследования. Риск повредить экран при установке минимален. Существует возможность осуществлять ремонтные работы под водой без понижения уровня воды в водохранилище. Для открытых систем необходимо устройство дренажного слоя, состоящего из геосетки с высокой пропускной способностью для сбора и отвода фильтрационной воды, которая может появляться вследствие каких-либо непредвиденных повреждений экрана. Дренажный слой также защищает облицовку от негативного воздействия противодействия, возникающего за ней в случае быстрой сработки водохранилища. Эффективность данной технологии подтверждается ростом количества плотин из малоцементного бетона с геокомпозитным противофильтрационным элементом на напорной грани. По состоянию на 2019 г. на 16 больших плотинах установлена открытая система, на 9 — закрытая. На рис. 6 представлены

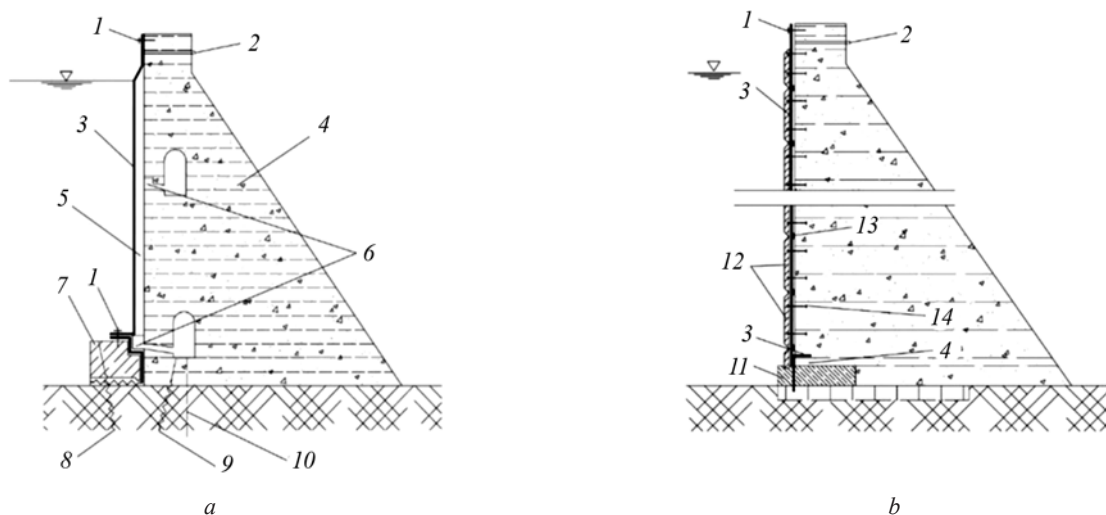


Рис. 5. Геокомпозитные системы, разработанные компанией Carpi Tech SA для плотин из малоцементного бетона: а — открытая система; б — закрытая система; 1 — крепление по периметру; 2 — вентиляционная труба; 3 — геокомпозитный экран; 4 — слои малоцементного бетона; 5 — дренажный слой; 6 — коллекторы для сбора дренажной воды; 7 — бетонная плита; 8 — цементация контакта плиты с основанием; 9 — цементационная завеса; 10 — дренаж основания; 11 — исходная панель; 12 — сборные бетонные панели; 13 — полоса из геомембраны; 14 — анкеры

Fig. 5. Geocomposite systems developed by Carpi Tech SA for low-cement content concrete dams: а — exposed system; б — covered system; 1 — fastening around the perimeter; 2 — ventilation pipe; 3 — geocomposite screen; 4 — layers of low-cement concrete; 5 — drainage layer; 6 — drainage water collectors; 7 — concrete slab; 8 — cementation of the slab contact with the foundation; 9 — cement-grout curtain; 10 — bed drainage; 11 — initial panel; 12 — precast concrete panels; 13 — geomembrane strip; 14 — anchors



Рис. 6. Геокомпозитные системы, установленные на напорных гранях плотин: *a* — плотина Миэль I, Колумбия, 2002, открытая геокомпозитная система; *b* — плотина Пенн Форест, США, 1998, закрытая геокомпозитная система

Fig. 6. Geocomposite systems installed on upstream faces of dams: *a* — Miel I, Columbia, 2002, an open geocomposite system; *b* — Penn Forest, USA, 1998, a closed geocomposite system

плотины из малцементного бетона с облицовками напорных граней с помощью открытой (рис. 6, *a*) и закрытой (рис. 6, *b*) геокомпозитных систем.

Четвертый тип плотин — это сооружения симметричного профиля с очень низкими требованиями к заполнителям и содержанием цемента от 50 до 80 кг/м³ (особо тощий малцементный бетон), что достаточно для обеспечения устойчивости сооружения. Малцементная смесь укладывается более толстыми слоями без устройства поперечных швов.

Впервые концепция строительства плотин из особо тощего малцементного бетона симметричного профиля появилась в 1970 г. Идея заключалась в строительстве сооружения, представляющего по своим характеристикам нечто среднее между бетонной гравитационной и грунтовой плотинами.

Увеличение объема особо тощего бетона тела плотины не приводит к ее существенному удорожанию благодаря пониженным требованиям к заполнителям смеси и меньшему количеству цемента

по сравнению с сооружениями типов 1 и 2. В отличие от грунтовых плотин, в плотинах из особо тощего малцементного бетона исключен риск вымывания материала внутренних зон (внутренняя эрозия) из-за фильтрации. Также преимуществами являются: снижение требований к межслойным швам, проницаемость которых не представляет угрозы общей устойчивости сооружения ввиду установки противофильтрационного экрана на напорной грани; допустимость расслоения малцементной смеси, что также не оказывает влияние на требуемые прочностные характеристики; отсутствие необходимости в использовании опалубки при заложении откосов от $m = 0,75$ и выше. Как было указано выше, плотины такого типа являются полупроницаемыми, и необходимо предусмотреть противофильтрационный элемент на напорной грани. На рис. 7 представлен поперечный разрез плотины из особо тощего малцементного бетона симметричного профиля Филиатринос в Греции.

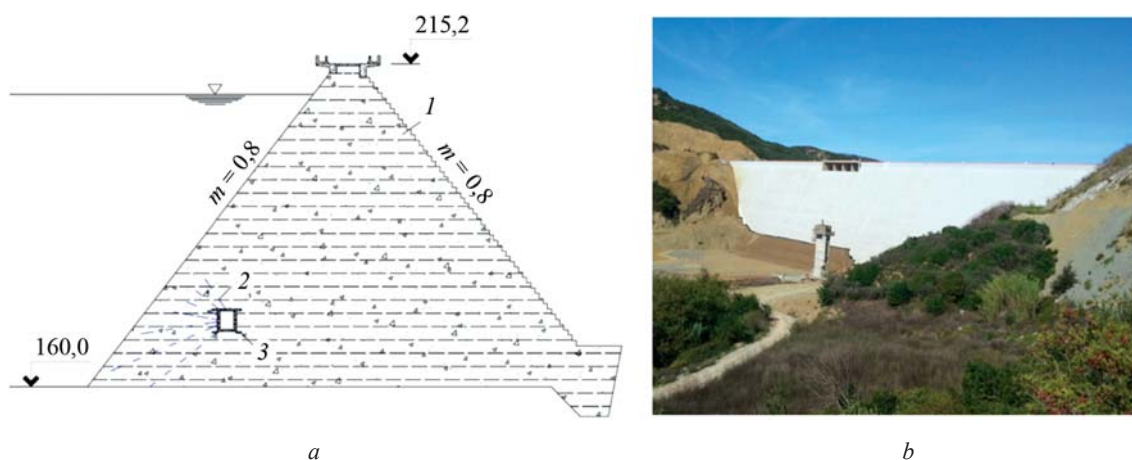


Рис. 7. Плотина из особо тощего малцементного бетона симметричного профиля Филиатринос, Греция, 2015: *a* — поперечное сечение; *b* — установленный противофильтрационный экран: 1 — слои малцементного бетона; 2 — дренажные скважины; 3 — дренажная галерея

Fig. 7. Symmetrical profile dam made of lean low-cement concrete, Filiatrinos, Greece, 2015: *a* — cross section; *b* — water-proofing screen; 1 — layers of low-cement concrete; 2 — drainage wells; 3 — drainage gallery

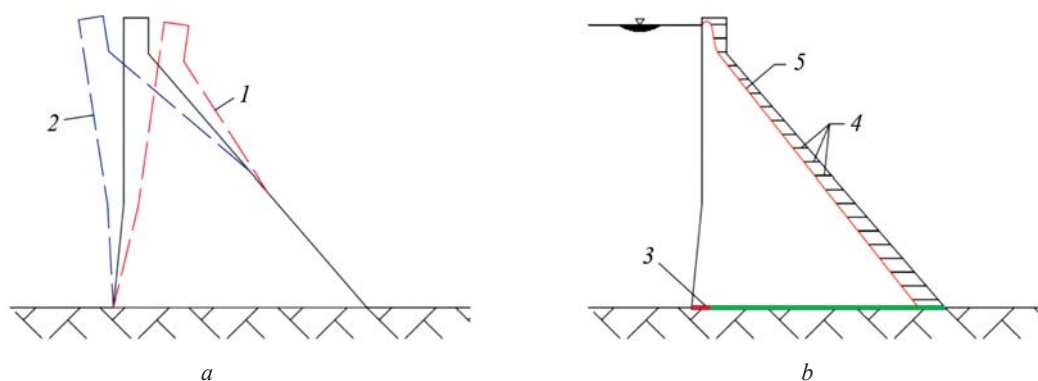


Рис. 8. Воздействие температуры на гравитационные плотины: *a* — картина деформации от температурного воздействия эксплуатационного периода; *b* — раскрытие контактного и строительных швов; 1 — деформации зимнего периода; 2 — деформации летнего периода; 3 — раскрытие контактного шва; 4 — строительные швы; 5 — Нулевая изотерма

Fig. 8. Temperature effect on gravity dams: *a* — temperature-induced deformation within the term of operation; *b* — opening of contact and construction joints; 1 — winter period deformations; 2 — summer period deformations; 3 — opening of the contact joint; 4 — construction joints; 5 — Zero isothermal line

Расход цемента для этой плотины составил 58 кг/м^3 (51 кг/м^3 цемента и 7 кг/м^3 золы уноса). В качестве противофильтрационного элемента был использован геокompозитный экран на напорной грани.

Одним из существенных воздействий на плотины из малцементного бетона служит температура (рис. 8).

Проблемы температурного влияния строительного периода связаны в основном с экзотермическим разогревом конструкции в результате гидратации цемента и возможным по этой причине трещинообразованием. Несмотря на низкий расход цемента при возведении таких конструкций, проблема экзотермического разогрева и температурного трещинообразования является достаточно для них актуальной.

Воздействие температурных факторов на бетонную плотину продолжается и в эксплуатационный период. Основные действующие на конструкцию температурные воздействия — это температура воздуха; температура воды водохранилища и нижнего бьефа; тепловое воздействие со стороны основания плотины и солнечная радиация.

Эти температурные факторы вызывают дополнительные деформации и температурные напряжения (рис. 8, *a*), что может ухудшать состояние плотины от основных действующих нагрузок. Возможное раскрытие строительных межслойных швов и контактного шва в зимний период (рис. 8, *b*) ухудшает напряженно-деформированное состояние (НДС) и устойчивость сооружения.

В качестве примера негативного воздействия температуры на плотины из малцементного бетона рассмотрим более подробно плотины Аппер Стилуотер (США) и Волвенданс (ЮАР). На первой из плотин температурные трещины возникли в период строительства, на второй — в период эксплуатации.

При строительстве плотины Аппер Стилуотер большая часть бетона была уложена за 10 месяцев с мая 1986 г. по сентябрь 1987 г. Толщина слоев укладываемого бетона составляла $0,3 \text{ м}$. Для достижения необходимой для укладки малцементного бетона температуры 10°C работы производились в ночное время, а для охлаждения бетонной смеси использовался лед. Тем не менее максимальная температура в бетонном массиве составила 36°C в области у гребня плотины, превысив тем самым ожидаемую максимальную температуру на 8°C .

Через пять месяцев, по прошествии холодной зимы, температура опустилась до 5°C или на 31°C по сравнению с максимальным нагревом. В результате столь быстрого охлаждения образовались трещины в районе гребня плотины, которые далее развились как на низовой, так и на напорной гранях. Во время первого наполнения водохранилища фильтрационный расход через самую крупную трещину достигал 50 л/с . Решение проблемы осуществлялось в два этапа на протяжении 5 лет путем инъецирования различными составами. В результате удалось существенно снизить фильтрацию через наиболее крупную трещину с 50 до 2 л/с .

Арочно-гравитационная плотина из малцементного бетона Волвенданс расположена на р. Грейт-Брак в ЮАР. Назначение — водоснабжение. Высота плотины — 135 м , длина по гребню — 268 м . Радиус кривизны составляет 135 м . Строительство велось в 1988–1989 гг. Расход цемента — 58 кг/м^3 , плотность — $2440\text{--}2450 \text{ кг/м}^3$. Прочность на сжатие $23\text{--}29 \text{ МПа}$ была достигнута в возрасте 91 сут.

Температурные трещины возникли в эксплуатационный период после наполнения водохранилища. Ширина раскрытия трещин составила от $0,25$ до 3 мм . Наибольшее количество трещин образовалось в нижней части плотины. В верхней части и у гребня ширина раскрытия отмечалась

от 0,1 до 1,1 мм. Трещинообразование вызвано резким остыванием бетона (за непродолжительный период температура массива снизилась на 20 °С) вследствие того, что сечение плотины очень тонкое, что привело к интенсивному теплообмену с окружающей средой. Фильтрация через самые крупные трещины достигала 4,1 л/с. Проблема была решена путем многочисленных инъекций.

Таким образом, вопрос о температурном режиме и температурном трещинообразовании для плотин из малоцементного бетона остается актуальным и сегодня. Для его решения можно предложить следующие меры:

- развивать расчетные методики, позволяющие создавать прогнозные модели;
- осуществлять тщательный натурный мониторинг за температурным режимом при возведении и эксплуатации сооружений, составлять карту трещин и вырабатывать способы борьбы с ними;
- создавать малоцементные смеси с более низким тепловыделением и развивать системы охлаждения свежесложенных бетонных слоев и блоков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам работы можно сделать следующие выводы.

Возведение плотин из малоцементного бетона в настоящий момент является наиболее перспективным направлением в плотиностроении. Технология обеспечивает высокую скорость строительства и его экономическую эффективность благодаря снижению расходу цемента.

В большинстве случаев плотинам подобных типов необходим противофильтрационный экран на напорной грани. Экраны бывают бетонными/железобетонными или синтетическими. Первые имеют целый ряд проблем с трещинообразованием, низкой сейсмостойкостью и требуют регулярного ремонта. В свою очередь, геокомпозитные экраны лишены этих проблем и являются наиболее современными и надежными решениями по обеспечению водонепроницаемости сооружений.

Температурные воздействия оказывают существенное негативное влияние на работу сооружения в строительный и эксплуатационный периоды. Они могут приводить к трещинообразованию, неконтролируемой фильтрации через образовавшиеся трещины, ухудшению НДС и устойчивости сооружения.

Разработка расчетных методик и способов борьбы с температурным трещинообразованием — одно из наиболее приоритетных направлений для бетонных малоцементных плотин в настоящее время.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазовский В.Б., Радченко В.Г. Новые тенденции в строительстве грунтовых плотин // Гидротехническое строительство. 2013. № 1. С. 2–8.
2. Fujisawa T., Sasaki T. Development of the trapezoidal CSG dam // Hydropower & Dams. 2012. Vol. 19. Issue 3. Pp. 58–63.
3. Gu Q., Yu C., Lin P., Ling X., Tang L., Huang S. Performance Assessment of a Concrete Gravity Dam at Shenwo Reservoir of China Using Deterministic and Probabilistic Methods // International Journal of Structural Stability and Dynamics. 2014. Vol. 14. Issue 05. P. 1440002. DOI: 10.1142/S0219455414400021
4. Bayagoob K., Bamaga S. Construction of Roller Compacted Concrete Dams in Hot Arid Regions // Materials. 2019. Vol. 12. Issue 19. P. 3064. DOI: 10.3390/ma12193064
5. Gaspar A., Lopez-Caballero F., Modarelli-Farahmand-Razavi A., Gomes-Correia A. Methodology for a probabilistic analysis of an RCC gravity dam construction. Modelling of temperature, hydration degree and ageing degree fields // Engineering Structures. 2014. Vol. 65. Pp. 99–110. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.02.002
6. Mohamed I., Abu-Khashaba I., Adam A. Investigating the possibility of constructing low cost roller compacted concrete dam // Alexandria Engineering Journal. 2014. Vol. 53. Issue 1. Pp. 131–142. DOI: 10.1016/j.aej.2013.11.009
7. Kalpakci V., Bonab A.T., Ozkan M.Y., Gulcerce Z. Experimental evaluation of geomembrane/geotextile interface as base isolating system // Geosynthetics International. 2018. Vol. 25. Issue 1. Pp. 1–11. DOI: 10.1680/jgein.17.00025
8. Giroud J.P. Leakage Control using Geomembrane Liners // Soils and Rocks. 2016. Vol. 3. Pp. 213–235.
9. Yang P., Xue S.B., Song L., Zhu X.W. Numerical simulation of geomembrane wrinkle formation // Geotextiles and Geomembranes. 2017. Vol. 45. Issue 6. Pp. 697–701. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2017.08.001
10. Singh R.M., Bouazza A. Thermal conductivity of geosynthetics // Geotextiles and Geomembranes. 2013. Vol. 39. Pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2013.06.002
11. Bannour H., Goblet P., Mendes M., Touze-Foltz N. Numerical study of advective flow through composite liners // Environmental Geotechnics. 2016. Vol. 3. Issue 6. Pp. 379–385. DOI: 10.1680/envgeo.14.00043
12. Moutafis N.I., Thanopoulos Y. The geomembrane faced hardfill dam. Hydro 2015. Bordeaux, France, 2015.

13. Du C.B., Wu S.Y., Zhang S.R. Full-scale Dynamic Simulation and Visualization for Structure Safety and Schedule Coupling of RCC Gravity Dams // 2017 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA). 2017. Vol. 1. Pp. 481–487. DOI: 10.1109/ICSGEA.2017.96

14. Wang L., Yang H.Q., Zhou S.H., Chen E., Tang S.W. Mechanical properties, long-term hydration heat, shrinkage behavior and crack resistance of dam concrete designed with low heat Portland (LHP) cement and fly ash // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 187. Pp. 1073–1091. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.056

15. Zhang X., Li S., Li Y., Ge Y., Li H. Effect of superficial insulation on roller-compacted concrete dams in cold regions // Advances in Engineering Software. 2011. Vol. 42. Pp. 939–943. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2011.06.004

16. Kuzmanovic V., Savic L., Mladenovic N. Computation of Thermal-Stresses and Contraction Joint Distance of RCC Dams // Journal of Thermal Stresses. 2013. Vol. 36. Issue 2. Pp. 112–134. DOI: 10.1080/01495739.2013.764795

17. Анискин Н.А., Нгуен Хоанг. Прогноз трещинообразования бетонных массивных плотин при возведении в суровых климатических условиях // Вестник МГСУ. 2014. № 8. С. 165–178. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.8.165-178

18. Анискин Н.А., Нгуен Чонг Чык, Брянский И.А., Дам Хыу Хынг. Определение температурного поля и термонапряженного состояния укладываемого бетонного массива методом конечных элементов // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 11. С. 1407–1418. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.11.1407-1418

Поступила в редакцию 26 ноября 2019 г.

Принята в доработанном виде 4 марта 2020 г.

Одобрена для публикации 26 июня 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Николай Алексеевич Анискин** — доктор технических наук, профессор, директор Института гидротехнического и энергетического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет** (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 260568; nikolai_aniskin@mail.ru;

Алексей Михайлович Шайтанов — аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет** (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 993357; shaytanov.alexey@mail.ru.

REFERENCES

1. Glagovsky V.B., Radchenko V.G. New trends in the construction of soil dams. *Hydrotechnical construction*. 2013; 1:2-8. (rus.).

2. Fujisawa T., Sasaki T. Development of the trapezoidal CSG dam. *Hydropower & Dams*. 2012; 19(3):58-63.

3. Gu Q., Yu C., Lin P., Ling X., Tang L., Huang S. Performance Assessment of a Concrete Gravity Dam at Shenwo Reservoir of China Using Deterministic and Probabilistic Methods. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2014; 14(05):1440002. DOI: 10.1142/S0219455414400021

4. Bayagoob K., Bamaga S. Construction of Roller Compacted Concrete Dams in Hot Arid Regions. *Materials*. 2019; 12(19):3064. DOI: 10.3390/ma12193064

5. Gaspar A., Lopez-Caballero F., Modaresi-Farahmand-Razavi A., Gomes-Correia A. Methodology for a probabilistic analysis of an RCC gravity dam construction. Modelling of temperature, hydration degree and ageing degree fields. *Engineering Structures*. 2014; 65:99-110. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.02.002

6. Mohamed I., Abu-Khashaba I., Adam A. Investigating the possibility of constructing low cost

roller compacted concrete dam. *Alexandria Engineering Journal*. 2014; 53(1):131-142. DOI: 10.1016/j.aej.2013.11.009

7. Kalpakci V., Bonab A.T., Ozkan M.Y., Gulerce Z. Experimental evaluation of geomembrane/geotextile interface as base isolating system. *Geosynthetics International*. 2018; 25(1):1-11. DOI: 10.1680/jgein.17.00025

8. Giroud J.P. Leakage Control using Geomembrane Liners. *Soils and Rocks*. 2016; 3:213-235.

9. Yang P., Xue S.B., Song L., Zhu X.W. Numerical simulation of geomembrane wrinkle formation. *Geotextiles and Geomembranes*. 2017; 45(6):697-701. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2017.08.001

10. Singh R.M., Bouazza A. Thermal conductivity of geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*. 2013; 39:1-8. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2013.06.002

11. Bannour H., Goblet P., Mendes M., Touze-Foltz N. Numerical study of advective flow through composite liners. *Environmental Geotechnics*. 2016; 3(6):379-385. DOI: 10.1680/envgeo.14.00043

12. Moutafis N.I., Thanopoulos Y. *The geomembrane faced hardfill dam*. Hydro 2015. Bordeaux, France, 2015.
13. Du C.B., Wu S.Y., Zhang S.R. Full-scale Dynamic Simulation and Visualization for Structure Safety and Schedule Coupling of RCC Gravity Dams. *2017 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA)*. 2017; 1:481-487. DOI: 10.1109/ICSGEA.2017.96
14. Wanga L., Yang H.Q., Zhou S.H., Chen E., Tang S.W. Mechanical properties, long-term hydration heat, shrinkage behavior and crack resistance of dam concrete designed with low heat Portland (LHP) cement and fly ash. *Construction and Building Materials*. 2018; 187:1073-1091. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.056
15. Zhang X., Li S., Li Y., Ge Y., Li H. Effect of superficial insulation on roller-compacted concrete dams in cold regions. *Advances in Engineering Software*. 2011; 42:939-943. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2011.06.004
16. Kuzmanovic V., Savic L., Mladenovic N. Computation of Thermal-Stresses and Contraction Joint Distance of RCC Dams. *Journal of Thermal Stresses*. 2013; 36(2):112-134. DOI: 10.1080/01495739.2013.764795
17. Aniskin N.A., Nguyen Hoang. Predicting crack formation in solid concrete dams in severe climatic conditions during construction period. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2014; 8:165-178. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.8.165-178 (rus.).
18. Aniskin N.A., Nguyen Trong Chuc, Bryansky I.A., Dam Huu Hung. Determination of the temperature field and thermal stress state of the massive of stacked concrete by finite element method. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2018; 13(11):1407-1418. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.11.1407-1418

Received November 26, 2019

Adopted in a revised form on March 4, 2020

Approved for publication June 26, 2020

BIONOTES: **Nikolai A. Aniskin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of hydraulic engineering and power plant construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 260568; nikolai_aniskin@mail.ru;

Alexey M. Shaytanov — graduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 993357; shaytanov.alexey@mail.ru.

Assessment of applicability of MIKE 11-NAM hydrological module for rainfall runoff modelling in a poorly studied river basin

Anghesom A. Ghebrehiwot^{1,2}, Dmitry V. Kozlov²

¹ Hamelmalo Agricultural College, National Higher Education and Research Institute; Keren, Eritrea;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The need to simulate hydrological processes is caused by, among other factors, the complexity of hydrological systems and data insufficiency due to the unavailability or a small number of instrumental observations. Recently, the reanalysis of the climate data supplied by the world's leading meteorological centres has been used quite successfully in the regions that suffer from the deficit of instrumental information. This paper assesses the applicability of climate reanalysis data to rainfall runoff ("rainfall runoff") modelling in the poorly studied river basin in Eritrea.

Materials and methods. Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) data generated by the National Centre for Environmental Prediction (USA) were used. Besides, high-resolution topographic information, generated by the SRTM international research project, was also applied to set the drainage area boundaries and to simulate the river network using such tools as MIKE and GIS. In addition, calibration and validation (evaluation) of the hydrological model (simulation quality) were performed using the Nash-Sutcliffe efficiency criterion, the determination coefficient, and the root mean square error of volumetric and peak flow rates.

Results. The results suggest that a considerable overestimation of precipitation in the reanalysis data set, which in turn has a significant effect on other variables such as potential evapotranspiration, leads to a significant discrepancy between water balance values which are simulated and registered by the hydrographs.

Conclusions. The applicability of Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) data to river flow modelling in arid and semi-arid regions such as Eritrea is questionable. The incompatibility of spatial and temporal variations of initial variables (e.g. precipitation), derived from reanalysis data sets and instrumental observations, is undoubtedly the main reason for errors. Thus, the application of reanalysis data sets and development of hydrological models for the region under study requires further intensive research aimed at identifying most effective mechanisms designated for the harmonization of differences between reanalysis data and field observations. In the course of further research, CFSR information is to be converted into more realistic data; climate reanalysis indicators, provided by other sources and designated for different time scales in the context of the "rainfall runoff" model are to be assessed, and the efficiency of other software systems is to be compared with MIKE 11-NAM.

KEYWORDS: Eritrea, reanalysis of the climate forecast system, hydrological simulation, Mereb-Gash, MIKE 11-NAM model, rainfall runoff

FOR CITATION: Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V. Assessment of applicability of MIKE 11-NAM hydrological module for rainfall runoff modelling in a poorly studied river basin. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(7):1030-1046. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.1030-1046 (rus.).

Оценка применимости гидрологического модуля MIKE 11-NAM для моделирования дождевого стока в малоизученном речном бассейне

Ангхесом А. Гебрехивот^{1,2}, Д.В. Козлов²

¹ Национальный институт высшего образования и научных исследований; г. Керэн, Эритрея;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Необходимость моделирования гидрологических процессов обусловлена, в том числе, сложностью гидрологических систем, а также недостаточностью данных из-за отсутствия или малочисленности инструментальных наблюдений. С недавнего времени реанализ климатических сведений, полученных ведущими метеорологическими центрами мира, достаточно успешно используется в регионах с дефицитом инструментальной информации. Настоящая работа направлена на оценку применимости данных реанализа климата для моделирования дождевого стока (осадки – сток) в малоизученном речном бассейне на территории Эритреи.

Материалы и методы. Использованы данные реанализа системы климатических прогнозов (CFSR) Национального центра прогнозирования окружающей среды (США). Также для определения границ водосборов и формирования модели речной сети в рамках таких инструментов, как MIKE и GIS, использовалась топографическая информация высокого разрешения, полученная в ходе реализации международного исследовательского проекта SRTM. Кроме

того, процессы калибровки и валидации (оценивания) гидрологической модели (качество моделирования) выполнялись с применением критерия эффективности Нэша-Сатклиффа, коэффициента детерминации и среднеквадратичной ошибки корня объемных и пиковых расходов.

Результаты. Полученные результаты свидетельствуют о том, что заметное завышение количества осадков в массиве данных реанализа, которые, в свою очередь, оказывают существенное влияние на другие переменные, такие как потенциальная эвапотранспирация, приводит к значительному несоответствию между смоделированным и наблюдаемым гидрографами и водным балансом.

Выводы. Применимость сведений реанализа системы климатических прогнозов (CFSR) для моделирования речного стока в условиях засушливых и полусушливых регионов, таких как Эритрея, вызывает некоторые сомнения. Несовместимость пространственных и временных вариаций исходных переменных (например, осадков) из массивов данных реанализа и наземных инструментальных наблюдений, несомненно, является основной причиной ошибок. Таким образом, разработка гидрологических моделей для условий исследуемого региона на основе массивов данных реанализа требует дальнейших интенсивных проработок с целью поиска наиболее эффективных механизмов, позволяющих гармонизировать различия между сведениями реанализа и натурными наблюдениями. На следующих этапах исследования необходимо выполнить преобразование CFSR-информации в более реалистичные данные, оценить показатели климатического реанализа из других источников для различных временных масштабов в контексте модели «осадки – сток» и провести исследование эффективности иных программных комплексов в сравнении с MIKE 11-NAM.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Эритрея, реанализ системы климатического прогноза, гидрологическое моделирование, Мереб-Гаш, модель MIKE 11-NAM, осадки – сток

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гебрехивот А.А., Козлов Д.В. Оценка применимости гидрологического модуля MIKE 11-NAM для моделирования дождевого стока в малоизученном речном бассейне // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 7. С. 1030–1046. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.1030-1046

INTRODUCTION

The complexity of hydrologic systems and the inadequacy of data caused by limitations imposed by currently used measurement techniques [1] have resulted in the advancement of hydrological simulation. The accuracy of hydrological simulation-based predictions relies on the hydrological variability and measurement techniques. Hydrological variations include those of physiographic factors, such as climate, soils, vegetation, topography, geology as well as the growing effect of human activities. Despite their ever growing influence, the application of hydrological simulation keeps expanding its sphere of influence in environmental and water resources areas [2, 3]. Widespread application of hydrological models is primarily caused by swift developments in the computer technology [1–6]. However, there are still water management problems that existing models cannot address with sufficient confidence [2, 7–9]. The reasons for that can be reduced to the two principal factors. Firstly, almost all simulation tools have been primarily developed for boreal areas suggesting that models would possibly be boreal [2, 5, 10]. Despite ambitious global approaches, such as PUB, the majority of success stories were limited to gauged basins. Challenges linked to the lack of appropriate predictions in ungauged basins, especially in arid and semi-arid regions, are yet to be addressed [2, 10]. Secondly, unreliable climate projections and incomplete process understanding have caused substantial uncertainties in projections. Recent studies of predictions made in respect of ungauged basins [9–13] have demonstrated that the presence of global changes in spatio-temporal temperature and precipitation patterns, regional and local changes in river flows and hydro-chemical regimes as a result of combined effects of the climate change, land-use changes and long-term dynamics intrinsic to

the hydro-climatic system are some of the constraints that require joint efforts of hydrologists and the society.

Hydrological models have continually evolved since the middle of 19th century. Their history dates back to the rational method followed by single event-based models, for instance, a unit hydrograph [14]. Henceforth, numerous developments followed the unit hydrograph model, such as an instantaneous unit hydrograph [15], the theory of infiltration and overland flow [16, 17], soil conservation services¹ [18], etc. The most renowned of early continuous simulation models is the Stanford watershed model [19], followed by physical data models that encompass the whole hydrological cycle, for example, the European Hydrological System [20] and the topography model [21]. In the meantime, a number of either somewhat less comprehensive or complex models were developed over the years, for example, a hydrological engineering centre [22] and the Tank model [23], the monograph written by Kuchment [24], a deterministic “hydrograph” hydrological model [25], a precipitation runoff modelling system [26], a soil water assessment tool (SWAT) [27], an ecological model for applied geophysics [28], etc. Presently, global climate models are also able to simulate the global hydrological cycle using simplified physics based models. An overview of classified hydrological models is available in the works written by [4]. Refsgaard and Knudsen [29] compared different types of hydrological models in terms of data requirements and model performance. A review of the history, classification, selection, recent developments in hydrological modelling in the context of arid and semi-arid regions is available in [10, 29]. Among various modelling classifications, the lumped

¹ ISCS “Supplement A, Section 4, Chapter 10, Hydrology”: in National engineering handbook, Washington, D.C. : USDA, 1956.

conceptual type of mathematical models is the most easily and universally applicable model used in hydrology. In these models, rainfall runoff is based on conceptual representations of physical processes of water movement in the entire catchment area. The examples of such models include the Sacramento model [30], the Tank model [31], the Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV) model [32], and the MIKE 11-NAM model [33, 34]. However, the scope of this study will be limited to the NAM model (the abbreviation of the Danish “Nedbør-Afstrømnings-Model”, meaning a precipitation runoff model) that was originally developed at the Institute of Hydrodynamics and Water Resources, Technical University of Denmark. It is a deterministic, lumped, conceptual mathematical model based on a set of linked mathematical statements, describing the behaviour of the land phase of the hydrological cycle² [35].

The NAM model has been used by many researchers [36, 37] to simulate the runoff from gauged and ungauged catchments. For example, three modelling systems were compared in [36]: a lumped conceptual rainfall runoff modelling system (NAM), a semi-distributed hydrological modelling system (WATBAL), and a distributed physics based hydrological modelling system (MIKE SHE). The results have proven the usefulness of a model designated for runoff predictions in basins having different hydrological regimes and climatic settings around the world. The NAM model could also be utilized for various other purposes; for example, it could help to optimize water supply and water management in irrigation and drainage systems [38].

Extensive studies of integrated water resources in the Mereb-Gash river basin are yet to be performed.

² DHI “A Modelling System for Rivers and Channels Reference Manual”. 2017.

So far, only a handful of studies [39–41] attempt to understand the hydrology of the area. Others [42, 43] have assessed the environmental impacts of flooding and downstream and possible mitigation mechanisms. These modelling efforts range from simple conceptual hydrological models to distributed physics based complex models. One of the main challenges tackled by all these studies is the acute shortage of hydrometeorological data, resulting in the unreliability and uncertainties of model outputs. Under these circumstances, global reanalysis products are to fill the gap in data scarce regions [44–48]. Therefore, numerous studies [44–46] verified the usefulness of CFSR in hydrological modelling.

The objective of this paper, therefore, is to assess the applicability of the NAM rainfall runoff model to runoff simulations and water balance estimations in appropriate locations within the Mereb-Gash river basin in Eritrea. To this end, CFSR reanalysis datasets are used to obtain model input variables.

MATERIALS AND METHODS

Description of the research area

This study is focused on the Mereb-Gash river basin, having an outlet near Kassala town in Sudan. It is a transboundary river basin, originating from Mount Teqera, south-west of the capital city of Asmara, Eritrea (Fig. 1). Nearly 75 % of the total area (22,849.60 km²) lies in the Eritrean territory³. Geographically, the outlet selected for this study is located at 36.39° E and 15.45° N. The elevation varies from over 3,200 m in the Ethiopian highland to 517 m above the mean sea

³ Euroconsult, “Sector study on national water resources and irrigation potential: component 1 report surface water resources,” Arnhem, Netherlands, 1998

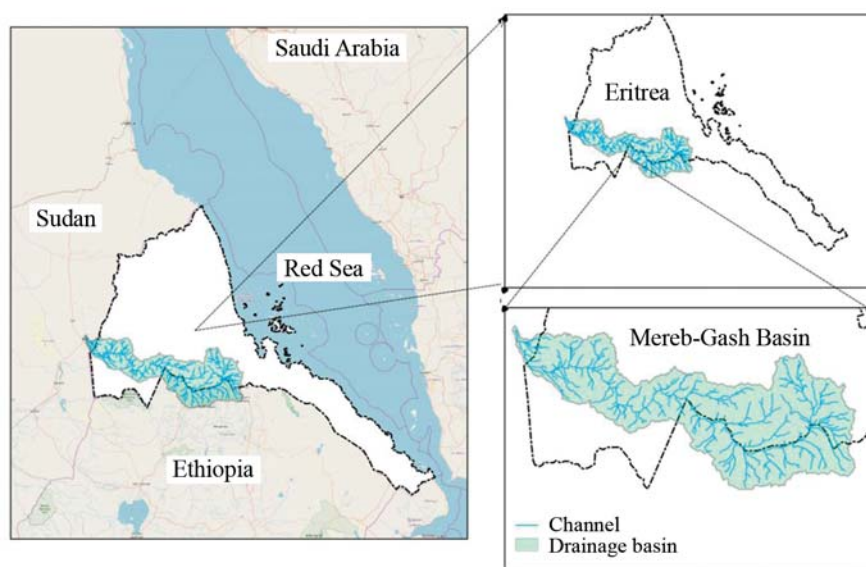


Fig. 1. Geographical location of Eritrea and the Mereb-Gash river basin [41]

level in the outlet area. The basin is long (the length of the main channel is about 500 km) and narrow; its shape is elongated, and its topography is undulating. The waters of the Mereb-Gash river don't usually reach the Nile river; rather, they are lost in the sands of the eastern plains of Sudan. The official reports issued by the Water Resources Department (Eritrea) indicate that the climate and the flow vary in the basin¹. The mean annual flow is estimated to be 680 million m³ [43] and the maximum flow rate is 1,000 m³s⁻¹ [44]. It is dry during the most part of the year but it is exposed to flash floods in rainy seasons, transporting 40 million m³ of sediment. The rainy season usually starts in June and ends in September; it brings several flood flows; for example, the return period of severe floods in Kassala town is 1 to 5 years [43]. Similarly, western plain areas in Eritrea had been repeatedly exposed to flooding. A long-term annual rainfall usually ranges from over 900 mm to less than 300 mm¹. The rainfall is considered as a moderate to high intensity event of short duration with a limited coverage. The coverage appears to be always below 20–30 km and even smaller¹. The temperature is highest in April and May and lowest in December and January, ranging from below 10 °C in the highlands to more than 45 °C in the lowlands.

Description of the NAM model

MIKE 11 is a powerful hydrological modelling system used to solve multi-component water management problems. It has several modules, including hydrodynamic and advection-dispersion units, sediment transport facilities, MIKE Eco lab, a flood forecasting facility, a rainfall runoff unit, etc. In some cases, they can be used either in combination with other modules or as standalone simulators [35]. MIKE 11 has different types of rainfall runoff models, such as NAM, a hydro-

graph model, a soil moisture meter and a soil conservation facility collectively used to assess the storm runoff, etc. As it was mentioned in the preceding section, the scope of studies covered by this article is limited to the NAM model.

NAM simulates overland flow, interflow, and baseflow components as a function of the moisture contents in different storage systems. It is applicable independently or together with other modules. NAM has the potential to handle either a single catchment or a large river basin that has numerous sub-catchments and a complex network of river channels within the same modelling framework. Conceptual models (for example, a unit hydrograph [14] and NAM) rely on the laws of physics and semi-empirical regularities. Being a lumped-element model, NAM ignores the spatial variability of variables and parameters, thereby treating each catchment as a single unit. Thus, the parameters and variables represent average values for the entire catchment. While a typical range of likely parameter values can be provided in certain cases, it is not always possible to determine all parameters based on climate and catchment characteristics. Thus, the final parameter estimation must be performed by calibration against measured data. Table 1 lists the basic parameters of the NAM model and their brief descriptions.

Model structure

The schematic representation of the NAM model structure is shown in Fig. 2. It has various components of hydrological processes in four different and interconnected storage reservoirs: the snow storage reservoir, the surface storage reservoir, the lower zone (root zone) storage reservoir, and the groundwater storage reservoir. Additionally, the model takes account of artificial interventions into hydrological processes, such

Table 1. Basic parameters of the NAM model

Parameter	Description
$U_{\max}$	The upper limit of the amount of water in the surface water storage reservoir. It is the water content in interception storage, depression storage and surface storage reservoirs. It is continuously lost to evaporation, interflow and infiltration. The typical values of $U_{\max}$ are in the range of 10–20 mm
$L_{\max}$	Maximum water content in the lower zone storage. It represents soil moisture below the surface from which plants take water for transpiration. As a rule, $U_{\max} = 0.1 L_{\max}$ where $L_{\max}$ is in the range of 100–300 mm
$CQOF$	Overland flow runoff coefficient. $CQOF$ values are in the range of 0 and 1 and determine the distribution of excess rainfall between the overland flow and infiltration
CK_{IF}	Time constant for the interflow from the surface storage reservoir. CK_{IF} is the dominant routing parameter of the interflow because $CK_{IF} > CK_{12}$. CK_{IF} values are in the range of 500–1,000 hours
CK_{12}	Time constant for overland flow and interflow routing. The overland flow and the interflow are routed through two successive linear reservoirs with time constants CK_{12} . Typical values are in the range of 3–48 hours
TOF, TIF, TG	Threshold values for overland flow, interflow and groundwater recharge, respectively. The flow is only generated if the relative moisture content in the lower storage zone is above the threshold value. Their values are in the range of 0–1
CK_{BF}	Time constant for baseflow routing. The baseflow from the groundwater storage reservoir is generated using a linear reservoir model with time constant CK_{BF} . CK_{BF} values being in the range of 500–5,000 hours

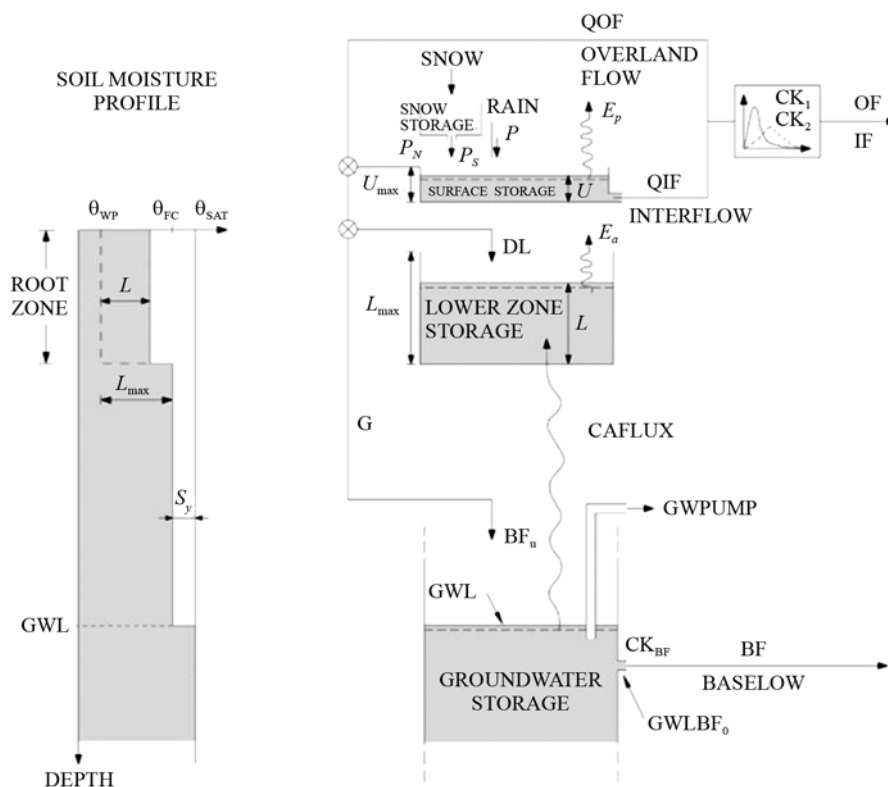


Fig. 2. NAM model structure [35]

as irrigation and groundwater pumping. Ultimately, the model produces output, i.e., catchment runoff, as well as the information about other elements that comprise the land phase of the hydrological cycle, such as the temporal variation of evapotranspiration, soil moisture content, groundwater recharge, and groundwater levels.

Model calibration objectives

In this work, both manual and automatic calibration procedures were employed with consideration for four calibration objectives. An automatic optimization routine based on a multi-objective optimization strategy, in which four objectives can be simultaneously optimized, is part of the NAM model. These objectives relate to coherence between different simulated and observed characteristics of hydrographs, including timing, rate and volume. Hydrograph characteristics include water balance, shape, peak and low flows. In manual calibration, a trial-and-error parameter was employed so that the goodness-of-fit of the calibrated model could be identified based on the visual examination by means of comparing simulated and observed hydrographs. Manual calibration has the advantage of adjusting parameters except for those listed in Table 1 and whenever one of the objectives takes priority over other ones [35]. On the other hand, calibration objectives are formulated as numerical goodness-of-fit measures that are optimized automatically. Numerical performance measures for four calibration objectives proposed by [49] are provided in equations (1) through (4):

The overall volume error

$$F_1(\theta) = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Q_{obs,i} - Q_{sim,i}(\theta)] \right|. \quad (1)$$

The overall root mean square error (RMSE)

$$F_2(\theta) = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Q_{obs,i} - Q_{sim,i}(\theta)]^2 \right]^{1/2}. \quad (2)$$

The average RMSE of peak flow events

$$F_3(\theta) = \frac{1}{M_p} \sum_{j=1}^{M_p} \left[\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} [Q_{obs,i} - Q_{sim,i}(\theta)]^2 \right]^{1/2}. \quad (3)$$

The average RMSE of low flow events

$$F_4(\theta) = \frac{1}{M_l} \sum_{j=1}^{M_l} \left[\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} [Q_{obs,i} - Q_{sim,i}(\theta)]^2 \right]^{1/2}, \quad (4)$$

where $Q_{sim,i}$ and $Q_{obs,i}$ is a simulated and observed discharge at time i , respectively; N — the total number of time steps in the calibration period; M_p and M_l — the number of peak and low flow events, respectively; n_j — the number of time steps within peak/low flow event number j ; and θ — the set of model parameters to be calibrated.

Although the overall water balance error and overall RMSE are normally applied in general hydrological studies, high and low flow RMSE enjoyed equal attention. According to DHI [35], the goodness-of-fit of the calibrated model is basically affected by errors in meteorological input data, errors in recorded observations, errors

and simplifications inherent in the model structure, and errors caused by the use of non-optimal parameter values. The fact that the objective of the study was to assess the applicability of CFSR reanalysis datasets to runoff simulations, errors due to non-optimal parameters could only be handled at this stage. The length of the available streamflow data used for calibration and validation was another limitation in some cases. Normally, satisfactory calibrations require continuous observations of runoff for a period of 3–5 years. However, runoff series of a shorter duration will also be useful for calibration, although they do not ensure efficient model calibration [35]. It is recommended to validate the model with the help of the data not used in model calibration to ensure proper evaluation of its reliability and hydrological soundness. Hence, the split-sample test method is applied.

Evaluation measures

Simulated runoffs were compared with discharge measurements to evaluate the calibrated model. As it was described earlier, both graphical and numerical performance measurements were applied in the calibration process. Graphical evaluation means comparison between simulated and observed hydrographs, on the one hand, and between simulated and observed runoffs, on the other hand. Numerical performance measurements include the overall water balance error (i.e. the difference between average simulated and observed runoffs), and the measurement of the overall shape of the hydrograph based on the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) [50] according to

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [Q_{obs,i} - Q_{sim,i}]^2}{\sum_{i=1}^N [Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs}]^2}, \quad (5)$$

where $Q_{sim,i}$ and $Q_{obs,i}$ stand for the simulated and observed discharge during time i , respectively; and $\bar{Q}_{obs}$ stands for the average observed discharge. Nash – Sutcliffe efficiency can range from $-\infty$ to 1. An efficiency of 1 ($NSE = 1$) corresponds to perfect convergency between the simulated runoff and the observed data, the zero efficiency value ($NSE = 0$) indicates that the model predictions are as accurate as the mean of the observed data, whereas the efficiency value below zero ($NSE < 0$) occurs when the observed mean is a better predictor than the model. Threshold values indicating a model of sufficient quality are within the range of $0.5 < NSE < 0.65$.

Data-related requirements

Input data include model parameters, initial conditions, meteorological data, and streamflow data. Even though rainfall and potential evapotranspiration are the most important data, temperature and radiation can be taken account of, depending on the presence or absence of snow. However, as the study is focused on arid and semi-arid climatic conditions, snow could be neglected. NAM model also offers an option to incorporate irrigation and groundwater pumping activities as part of the

modelling process. However, these issues were excluded from the study for the two main reasons. Firstly, although the detailed historical background information on irrigation and groundwater in the basin was unavailable, major diversion structures, large reservoirs, hydropower plants and water consumers that could significantly affect the magnitude of the streamflow were unavailable during the reanalysis period. The renowned diversion structure at Teseney established in 1928 during the Italian colonial era is the only exception. A vast agricultural development project in Aligidir was to irrigate approximately 10,000 hectares of land. However, its operation was hampered primarily due to pre- and post-independence wars. Apart from the limited information about the efforts to revitalize the project, its current status, water consumption, extent and type of irrigation are yet unknown. Nonetheless, most of the agricultural practices within the basin predominantly relied on seasonal rainfalls, i.e., modern technology-based irrigation projects hardly existed. In this regard, DHI [35] recommends that minor irrigation schemes within a catchment may be neglected as they normally have little influence on catchment hydrology. Secondly, groundwater was the main source of water for different uses. As for the part of the Mereb-Gash river basin, characterized by relatively low evapotranspiration, rugged topography and poor soil formations, groundwater supply is supplemented by surface waters stored in small reservoirs and ponds outside the main river channel. Keeping the above facts in mind, two approaches were implemented in the NAM model operation: (i) operation without irrigation and pumping and (ii) operation that includes irrigation and pumping. Rainfall, potential evapotranspiration and streamflow for calibration and validation were applied to both approaches.

Generally, the time scale of rainfall and potential evapotranspiration depends on the purpose of the study and on the time scale of the catchment response. Based on the DHI [35] recommendations, daily and monthly values of rainfall and potential evapotranspiration were used in model calibration and accuracy evaluation. Different time scales (hourly and daily) of the streamflow data were used depending on their availability at stream gauging stations near Kassala, Gherger, and Gala Adinfas. Given the scarcity of data, CFSR datasets, which are available at the 38 km resolution, were supplied by the National Centres for Environmental Prediction — CFSR. The information, covering the period between 1979 and the middle of 2014, was collected from 32 stations. A CFSR-based spatial and statistical variability analysis of Mereb-Gash has recently been studied by a group of co-authors [41]. Following their recommendation on the suitability of potential evapotranspiration estimation methods, Penman-Monteith equation was employed. Moreover, a high-resolution digital elevation dataset for the study area, available from the shuttle radar topography mission at the global resolution of 1 arc-second, was used for catchment delineation and stream network formations in MIKE zero and QGIS.

Model setup

Rainfall, potential evapotranspiration and stream-flow time series were prepared in the required formats for the NAM model. However, the fact that the NAM model simulates the rainfall runoff process in a lumped way, there was a need to combine rainfall and evapotranspiration data from different stations within and around a single catchment, into a single time series of weighted averages. The resulting time series represented mean area values of aforementioned model input variables for a catchment. The Thiessen polygon method was intuitively selected among other available options (for example, isohyetal method). Fig. 3 shows the NAM

model set up for the study area. The partitioning of the whole basin into sub-catchments was done bearing in mind the limitations of lumped models, that is, they cannot be applied to catchments having larger areas because of the assumption of the spatial uniformity of variables. For example, the maximum area that a unit hydrograph (one of well-known lumped models) should be applied to, is less than 5,000 km². Moreover, previous works, based on the intensive survey and understanding of the catchment climate, geology, physiography were also taken into account to some extent. Thiessen polygon weightages from 32 stations, having the total area of 22,849.60 km², are presented in Table 2. The station that

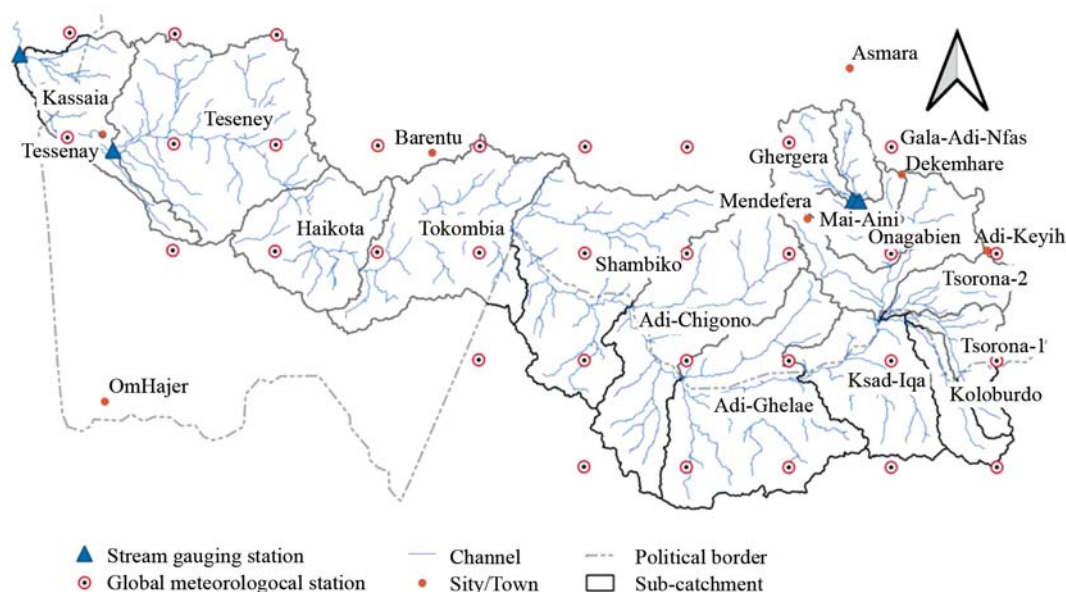


Fig. 3. NAM model set up for Mereb-Gash river basin

Table 2. Thiessen polygon weightages of sub-catchments

Sub-catchment	Area, km ²	Weightage						
Ghergera	561.00	0.92	0.04	0.04	—	—	—	—
Gala Adi-Nfas	329.90	0.10	0.88	0.02	—	—	—	—
Mai-Aini	624.10	0.02	0.11	0.65	0.22	—	—	—
Ona-Gabion	1,225.90	0.09	0.17	0.49	0.24	0.01	—	—
Adi-Keih-Tsorona	569.30	0.56	0.33	0.10	0.01	—	—	—
Tsorona-1	637.70	0.02	0.13	0.75	0.10	—	—	—
Koloburdo	523.10	0.40	0.14	0.41	0.06	—	—	—
Ksad-Iqa	1,496.10	0.21	0.56	0.22	0.01	—	—	—
Adi-Ghelae	2,887.10	0.05	0.29	0.02	0.26	0.22	0.16	—
Adi-Chigono	2,658.20	0.23	0.02	0.12	0.04	0.30	0.06	0.23
Shambiko	2,946.20	0.28	0.24	0.02	0.39	0.06	0.01	—
Tokombia	2,388.70	0.02	0.04	0.19	0.42	0.30	0.03	—
Haikota	1,486.40	0.33	0.07	0.56	0.04	—	—	—
Teseney	3,288.20	0.03	0.07	0.31	0.35	0.11	0.12	0.01
Kassala	1,227.70	0.11	0.03	0.04	0.44	0.38	—	—

was nearest to the sub-catchment under consideration had the largest influence and vice versa. Accordingly, each sub-catchment has a limited number of stations that contributed to average model input values. During the calibration of the NAM model, automatic calibration augmented by trial and error adjustment was performed in respect of each sub-catchment so as to obtain the optimal parameters with the best match between simulated and observed data. After the calibration process was completed, the model was verified at the sub-catchments selected for that purpose.

RESULTS AND DISCUSSION

In the preceding section, it was pointed out that two approaches were applied to calibration processes; they either included or failed to include irrigation and groundwater pumping. In the first case, the fact that real time and space data were missing, their effects on simulated runoffs were studied by assuming variable irrigation areas and groundwater extraction amounts. It was identified that these had no significant influence on simulated outputs generated by the NAM model, which fact was in line with the DHI [35] recommendations described in the preceding section. Thus, the discussion henceforth will focus on the second case, i.e., runoff simulation disregarding irrigation and groundwater pumping.

It was impossible to obtain parameters for each sub-catchment: two of the three stations, whose streamflow data are used for calibration and verification, are located close to each other. Therefore, the use of global param-

eters was the only viable option. Optimal parameters of Ghergera and Gala Adi-Nfas were applied to upper sub-catchments in the Mereb-Gash basin. These sub-catchments are characterized by relatively low potential evapotranspiration, low infiltration rate, and high runoff coefficient. On the contrary, remaining sub-catchments were assumed to have relatively better water retaining potentials, (thus, reducing the runoff coefficient value) higher infiltration rates and potential evapotranspiration. Consequently, corresponding parameters of automatic calibration algorithms were manually fine-tuned so that the combined simulated runoff became as close to the observed flow at the outlet (Kassala) as possible. Given these assumptions, the water balance, observed and simulated data provided by hydrographs, numerous calibration trials were performed. Ultimately, basic parameters identified by means of automated calibration, were adjusted and manually refined (Table 3).

According to Table 3, a smaller value of $CQOF = 0.50$ were obtained for a relatively flat catchment having coarse, sandy soils and a large unsaturated zone, whereas large $CQOF = 0.70$ was obtained for catchments with probably low, permeable soils, such as clay or bare rocks. Peak runoff events are caused by intensive overland flows. The peak volume was adjusted by changing the overland flow runoff coefficient ($CQOF$), whereas the shape of the peak was dependent on the time constant used in runoff routing (CK_{12}). Similarly, surface and root zone storages (U_{max} and L_{max}) were identified as the major parameters that affected evapotranspiration; the higher these values, the higher the rate of evapo-

Table 3. NAM model's basic parameters for the Mereb-Gash basin

Sub-catchment	Parameter								
	U_{max}	L_{max}	$CQOF$	CK_{IF}	CK_{12}	TOF	TIF	TG	CK_{BF}
Ghergera	15.20	194	0.70	1.000	47.70	0.90	0.90	0.40	3.000
Gala Adi-Nfas	15.20	194	0.70	1.000	47.70	0.90	0.90	0.40	3.000
Mai-Aini	15.20	194	0.70	1.000	47.70	0.90	0.90	0.40	3.000
Ona-Gabion	15.20	194	0.70	1.000	47.70	0.90	0.90	0.40	3.000
Adi-Keih-Tsorona	15.20	194	0.70	1.000	47.70	0.90	0.90	0.40	3.000
Tsorona	15.20	194	0.70	1.000	47.70	0.90	0.90	0.40	3.000
Koloburdo	15.20	194	0.70	1.000	47.70	0.90	0.90	0.40	3.000
Ksad-Iqa	15.20	194	0.70	1.000	47.70	0.90	0.90	0.40	3.000
Adi-Ghelae	15.20	194	0.70	1.000	47.70	0.90	0.90	0.40	3.000
Adi-Chigono	15.20	194	0.70	1.000	47.70	0.90	0.90	0.40	3.000
Shambiko	20.00	300	0.50	1.000	30.00	0.90	0.90	0.50	3.000
Tokombia	20.00	300	0.50	1.000	30.00	0.90	0.90	0.50	3.000
Haikota	20.00	300	0.50	1.000	30.00	0.90	0.90	0.50	3.000
Teseney	20.00	300	0.50	1.000	30.00	0.90	0.90	0.50	3.000
Kassala	20.00	300	0.50	1.000	30.00	0.90	0.90	0.50	3.000

transpiration and vice versa. Similarly, the base flow is affected by other runoff components; a decrease in the overland flow or the interflow causes a higher baseflow, and vice versa. The shape of the baseflow recession is a function of the baseflow time constant (CK_{BF}). Changes in root zone threshold values TOF and TIF were not significantly affecting the results; hence, the same values were applied. However, TG values were slightly different for upper and lower portions of the basin.

Calibration data-based runoff rates and accumulated volumetric runoffs are presented in Fig. 4 for three stations. In Fig. 4 (a, b and c), simulated and observed runoff hydrographs for Gala Adi-Nfas, Ghergera and Kassala (combined)⁴ are provided. The time span of the recorded flow at Ghergera was limited to one rainy season; hence, it is difficult to draw conclusions with certainty. Although the accumulated runoff (Fig. 4, e) shows better results as compared to other two options

;its corresponding simulated and observed hydrographs (Fig. 4, b) do not match in all aspects. Hydrographs from Gala Adi-Nfas and Kassala (Fig. 4 a and c) seem to capture the flow seasonality, although they do it with substantial volumetric and peak (low and high) discrepancy in terms of the flows. These discrepancies are clearly magnified in terms of accumulated runoffs shown in Fig. 4 (d and f). Moreover, all simulated hydrographs have demonstrated another point; that's the presence of the baseflow even in dry periods.

Parameters assigned to each sub-catchment covered by calibration processes (Table 3) were used in validation. Accordingly, simulated and observed runoff hydrographs for Gala Adi-Nfas, Ghergera and Kassala, were obtained as shown in Fig. 5 (a, b and c). The discrepancy between simulated and observed hydrographs is worse than the calibration results (Fig. 4); the timing, the rate of high and low peaks, the volume, and the shape of hydrographs are totally different from observed runoffs.

⁴ Kassala (combined) represents a runoff from a set of all the sub-catchments to be further used in the ensuing discussions.

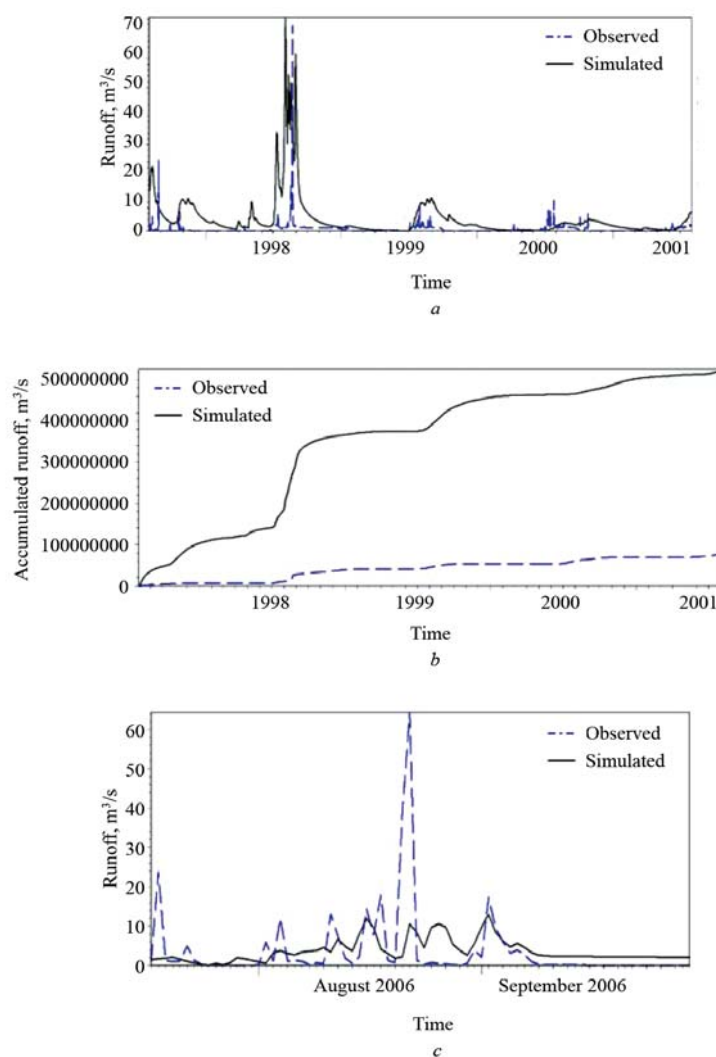


Fig. 4. Simulated and observed runoff rates and corresponding accumulated runoffs at selected stations in the aftermath of calibration processes at (i) Gala Adi-Nfas (a and b), (ii) Ghergera (c and d), and (iii) Kassala (e and f)

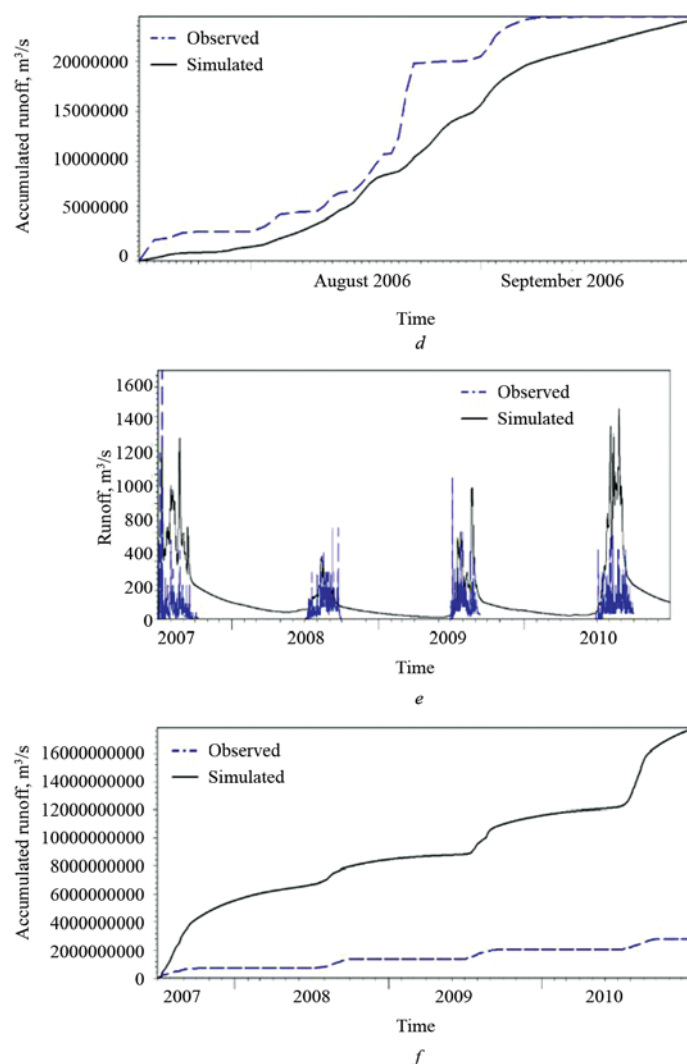


Fig. 4. Simulated and observed runoff rates and corresponding accumulated runoffs at selected stations in the aftermath of calibration processes at (i) Gala Adi-Nfas (*a* and *b*), (ii) Ghergera (*c* and *d*), and (iii) Kassala (*e* and *f*)

NSE, water balance and RMSE calibration and validation evaluation (Table 4) comply with the conclusion drawn from the graphical observation discussed earlier. Most of the NSE values are below zero meaning that the observed mean is a better predictor than the model. Moreover, the water balance also depicts a significant discrepancy between simulated and observed runoffs with the exception of Ghergera. RMSE values are above zero, thus, representing an imperfect convergence between observed and simulated runoffs. Similarly, other accuracy factors are presented in Table 5. Most of the measurements have proven NAM's poor performance in the area of interest.

What could be the reason for the unsatisfactory performance of the NAM model? To answer this question, one should think about evaluating various sources of errors discussed in the Materials and methods section. Let's dwell on the errors that originate from the reanalysis data, since other sources of errors are either manageable (for example, selection of non-optimal param-

eters) or unmanageable (for example, errors in recorded observations and errors and simplifications inherent in the model structure) for obvious reasons. In view of this fact, reanalysis (or satellite-based) data were compared with ground based rainfall data. Table 6 shows rainfall frequency values during rainy months over the period of 2004 to 2006 provided by ground-based and satellite-based stations in the Ghergera catchment, which are located close to each other (approximately 7 km apart). If we look at the satellite-based number of rainy days, it turns clear that in the months of July and August, the probability of a rainfall is approximately 100 %. However, the probability of a rainfall according to ground-based station is below 50 %. When minor rainfalls (< 5 mm) are excluded, the rainfall frequency prognosticated by the satellite is by far higher than the one prognosticated on Earth, especially in the months of July and August when the peak runoff occurs. The same observation was made in respect of all selected stations even in dry periods when a rainfall was less likely to occur. Therefore, it gives sense to associate the

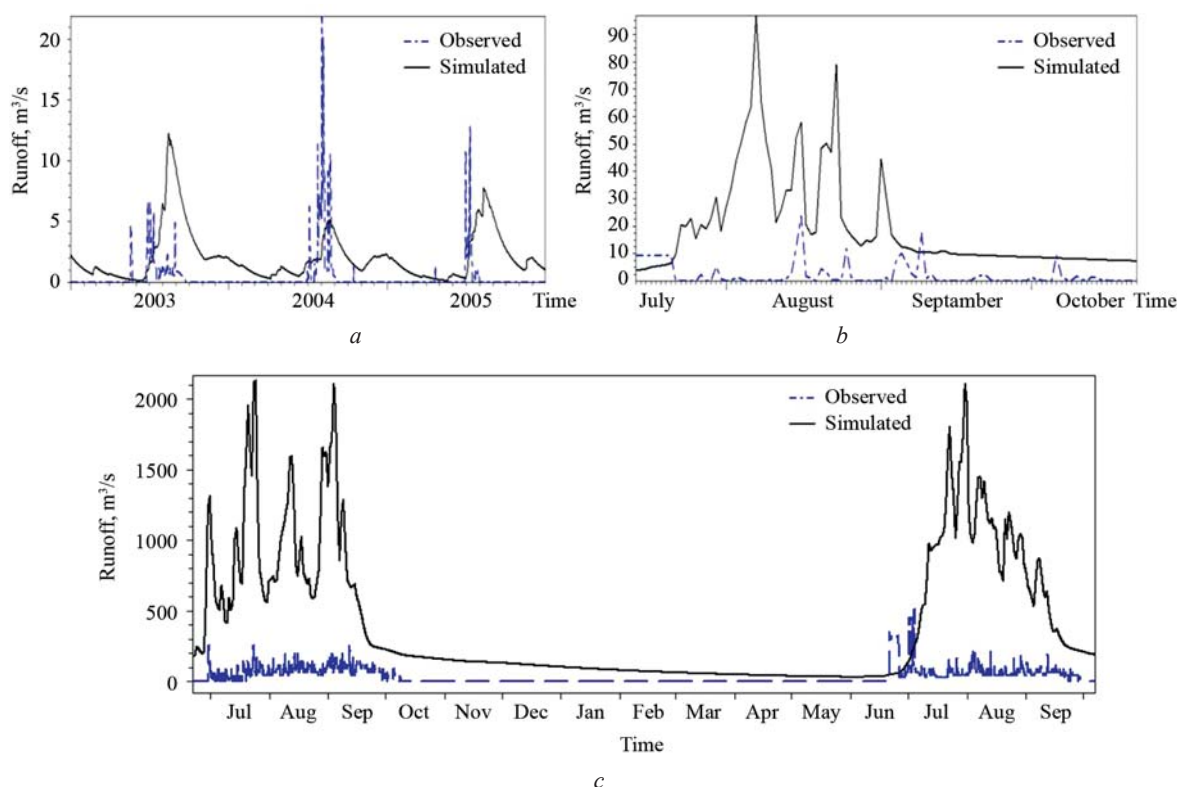


Fig. 5. Simulated and observed runoffs in the aftermath of validation processes: *a* — Gala Adi-Nfas, *b* — Ghergera (in 2007); *c* — Kassala (2011 and 2012)

Table 4. Calibration and validation evaluation figures

Sub-catchment	Calibration				Validation		
	NSE	Water balance		RMSE	NSE	Water balance	
		Observed, mm/year	Simulated, mm/year			Observed, mm/year	Simulated, mm/year
Ghergera	0.13	1.20	1.20	9.752	− 34.61	1.0	8.4
Gala Adi-Nfas	− 4.28	6.50	14.70	7.77	− 2.23	3.4	16.8
Kassala	− 9.74	3.50	22.00		− 96.67	1.6	22.1

Table 5. Calibration and validation accuracy factors

Accuracy factors	Calibration			Validation		
	Kassala	Gala Adi-Nfas	Ghergera	Kassala	Gala Adi-Nfas	Ghergera
Correlation factor	0.531	0.349	0.357	0.017	0.163	0.015
Peak error	0.178	5.197	1.143	− 0.981	0.784	− 0.754
Volume error	5.016	1.753	5.016	213.88	4.716	8.013
Peak time error	− 1142.208	0.000	− 11	− 8.00	354	9.000

Table 6. Frequency of rainy days prognosticated by ground- and satellite-based stations in Ghergera catchment

Year	Month	Number of rainy days		Number of rainy days > 5 mm	
		Ground-based	Satellite-based	Ground-based	Satellite-based
2004	Jul	9	29	6	5
	Aug	10	27	5	18

End of Table 6

Year	Month	Number of rainy days		Number of rainy days > 5 mm	
		Ground-based	Satellite-based	Ground-based	Satellite-based
2004	Sep	3	7	2	0
	Oct	3	6	2	0
2005	Jun	0	15	0	4
	Jul	13	30	6	24
	Aug	15	28	12	17
	Sep	2	14	1	1
	Oct	0	2	0	0
2006	Jun	0	14	0	0
	Jul	11	31	8	23
	Aug	13	31	7	22
	Sep	5	14	3	4
	Oct	3	7	2	2

poor performance of the NAM model with the overestimation of satellite-based rainfall measurements.

Graphical analyses of satellite- and ground-based rainfall stations were also conducted to understand their relationships. For the sake of illustration, correlations between the two sources of measurements are provided in Fig. 6. The analysis indicates poor correlation ($r = 0.364$) in terms of the annual rainfall (Fig. 6, *a*), whereas a strong correlation ($r = 0.984$) could be observed in terms of the monthly rainfall (Fig. 6, *b*). Most of the analyzed stations demonstrated more or less similar patterns.

CONCLUSIONS

In this work, the applicability of the NAM model to the simulation of runoffs from the ungauged basin in arid and semi-arid regions, such as the Mereb-Gash

river basin in Eritrea, using CFSR datasets, has been proven unreliable. Evaluation measures have proven the unsatisfactory performance of the model, and this conclusion differs from the findings of earlier studies [9–13]. Various sources of errors that could affect the goodness-of-fit of the calibrated model, the incompatibility of spatial and temporal variations of input variables extracted from reanalysis datasets and ground-based observations are undoubtedly among the primary sources of errors. CFSR datasets noticeably overestimated rainfall values which, in turn, affected corresponding input variables. We believe that it is too premature to consider this study as a strong argument to reject reanalysis datasets in runoff projections in arid and semi-arid areas. Rather, bearing in mind the resourceful nature of reanalysis datasets, on the one hand, and the shortage of reliable ground-based data, on the other hand, other mechanisms that can produce

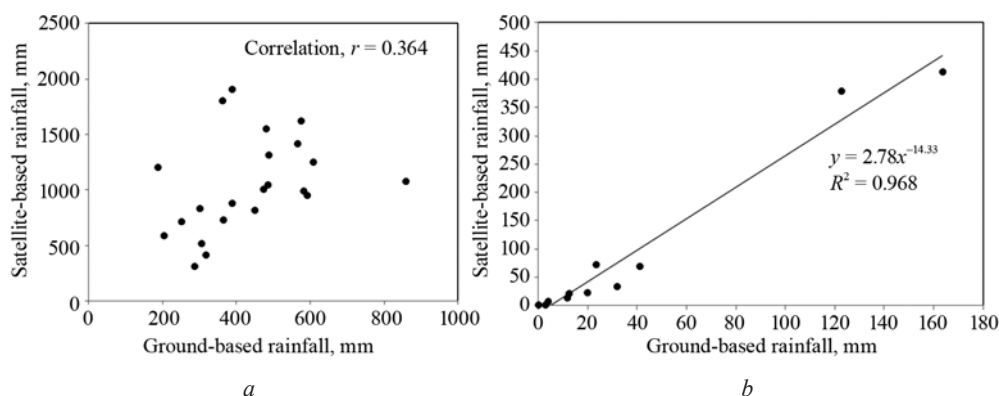


Fig. 6. Comparison of satellite-based and ground-based rainfall measurements taken at the stations in the Ghergera catchment, which are located close to each other: *a* — annual; *b* — monthly

better projections, need to be researched. For example, the effects of climate reanalysis sources and the time scale of runoff simulations could serve as the starting point. Furthermore, numerous sources [2, 10, 29] have proven that so far there is no universal model for runoff simulations. Thus, CFSR reanalysis datasets need to be studied using other hydrological models (for example,

SWAT), and appropriate hydrological modelling tools applicable to the area can be identified. The findings have also proven the uncertainty about global climate projection methods. Therefore, the co-authors would like to stress the need to enhance conventional hydro-meteorological data collection methods, such as rain and stream gauges

REFERENCES

1. McGlynn B.L., Blöschl G., Borga M., Bormann H., Hurkmans R., Komma J., Nandagiri L. et al. *A data acquisition framework for runoff prediction in ungauged basins*. Runoff Prediction in Ungauged Basins, 2013; 29-52. DOI: 10.1017/cbo9781139235761.006
2. Wheeler H., Sorooshian S., Sharma K.D. *Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas*. New York, Cambridge University Press, 2008.
3. Sivapalan M., Takeuchi K., Franks S.W., Gupta V.K., Karambiri H., Lakshmi V. et al. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*. 2003; 48(6):857-880. DOI: 10.1623/hysj.48.6.857.51421
4. Refsgaard J.C., Abbott M.B. *The Role of Distributed Hydrological Modelling in Water Resources Management*. Distributed Hydrological Modelling. Water Science and Technology Library, 1996; 22:1-16.
5. Mokoena M.P., Kapangaziwiri E., Kahinda J.M., Hughes D.A. *ECOMAG Model: an evaluation for use in South Africa*. WRC Report No. TT 555/13, 2013.
6. Kapangaziwiri E., Hughes D.A., Wagener T. Incorporating uncertainty in hydrological predictions for gauged and ungauged basins in southern Africa. *Hydrological Sciences Journal*. 2012; 57(5):1000-1019. DOI: 10.1080/02626667.2012.690881
7. Hughes D.A. Three decades of hydrological modelling research in South Africa. *South African Journal of Science*. 2004; 100:638-642.
8. Tegegne G., Park D.K., Kim Y. Comparison of hydrological models for the assessment of water resources in a data-scarce region, the Upper Blue Nile River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2017; 14:49-66. DOI: 10.1016/j.ejrh.2017.10.002
9. Hrachowitz M., Savenije H.H.G., Blöschl G., McDonnell J.J., Sivapalan M., Pomeroy J.W. et al. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB) — a review. *Hydrological Sciences Journal*. 2013; 58(6):1198-1255. DOI: 10.1080/02626667.2013.803183
10. Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V. Hydrological modelling for ungauged basins of arid and semi-arid regions: review. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(8):1023-1036. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1023-1036
11. Montanari A., Young G., Savenije H.H.G., Hughes D., Wagener T., Ren L.L. et al. “Panta Rhei — Everything Flows”: Change in hydrology and society — The IAHS Scientific Decade 2013–2022. *Hydrological Sciences Journal*. 2013; 58(6):1256-1275. DOI: 10.1080/02626667.2013.809088
12. Mount N.J., Maier H.R., Toth E., Elshorbagy A., Solomatine D., Chang F.-J. et al. Data-driven modelling approaches for socio-hydrology: Opportunities and challenges within the Panta Rhei Science Plan. *Hydrological Sciences Journal*. 2016; 1-17. DOI: 10.1080/02626667.2016.1159683
13. McMillan H., Montanari A., Cudennec C., Savenije H., Kreibich H., Krueger T. et al. Panta Rhei 2013–2015: global perspectives on hydrology, society and change. *Hydrological Sciences Journal*. 2016; 1-18. DOI: 10.1080/02626667.2016.1159308
14. Sherman L.K. *Streamflow from Rainfall by Unit-Graph Method*. Eng. News-Record, 1932; 108:501-505.
15. Nash J.E. *The form of the instantaneous unit hydrograph*. International Association of Hydrological Sciences, 1957; 45(3):114-121.
16. Horton R.E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union*. 1933; 14(1):446. DOI: 10.1029/tr014i001p00446
17. Horton R.E. Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration-capacity. *Transactions, American Geophysical Union*. 1939; 20(4):693. DOI: 10.1029/tr020i004p00693
18. Crawford N.H., Linsley R.K. *The synthesis of continuous stream flow hydrographs on a digital computer*. California, Tech. Rep. No. 12. 1962.
19. Abbott M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A., O’Connell P.E., Rasmussen J. An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, ‘SHE’, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*. 1986; 87(1-2):45-59. DOI: 10.1016/0022-1694(86)90114-9
20. Beven K.J., Kirkby M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*. 1979; 24(1):43-69. DOI: 10.1080/02626667909491834

21. Dawdy D.R., O'Donnell T. Mathematical models of catchment behaviour. *Journal of the Hydraulics Division*. 1965; 91(4):123-137.
22. Sugawara M. *The flood forecasting by a series storage type model*. International Symposium on Floods and their Computation, 1967; 1-6.
23. Kuchment L.S. *Mathematical modeling of river flow*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1972; 191. (rus.).
24. Vinogradov Yu.B. *Issues of hydrology of rain floods in small catchments of Central Asia and South Kazakhstan*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1967; 262. (rus.).
25. Leavesley G.H., Lichty R.W., Troutman B.M., Saindon L.G. *Precipitation-runoff modeling system: User's manual*. US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 83-4238, Reston, 1983; 207.
26. Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams J.R. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*. 1998; 34(1):73-89. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x
27. Motovilov Yu.G., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A. *ECOMAG - regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region*. Oslo, Department of Geophysics, University of Oslo P.O. Box 1022 Blindern 0315, 1999; 88.
28. Singh V.P., Woolhiser D.A. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2002; 7(4):270-292. DOI: 10.1061/(asce)1084-0699(2002)7:4(270)
29. Burnash R. *The NWS river forecast system-catchment modelling*. Computer Models of Watershed Hydrology, Colorado, Water Resources Publications, 1995; 311-366.
30. Sugawara M. et al. *Tank model and its application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin River, Kit-su River, Sanaga River and Nam Mune*. Research Note of the National Research Center for Disaster Prevention, 1974; 1-64.
31. Bergstrom S. *The HBV model*. Computer Models in Watershed Modeling, Colorado, Water Resources Publications, 1995; 443-476.
32. Nielsen S.A., Hansen E. Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis. *Hydrology Research*. 1973; 4(3):171-190. DOI: 10.2166/nh.1973.0013
33. Havnø K., Madsen M.N., Dørge J. *MIKE-11 a generalized river modelling package*. Computer Models of Watershed Hydrology, Colorado, Water Resources Publications, 1995; 733-782.
34. Refsgaard J.C., Knudsen J. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research*. 1996; 32(7):2189-2202. DOI: 10.1029/96wr00896
35. Madsen H. Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology*. 2000; 235(3-4):276-288. DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00279-1
36. Buber A.L. *Methodological approaches to solving the problems of multicriteria optimization for the management of water resources of river basins in the interests of water users of the agro-industrial complex (AIC)*. Moscow, All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakova, 2018; 75-89. (rus.).
37. Kozlov D.V., Ghebrehiwot A.A. Efficacy of digital elevation and Nash models in runoff forecast. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 87(3):103-122. DOI: 10.18720/MCE.87.9
38. Ghebrehiwot A., Kozlov D. GIUH-Nash based runoff prediction for Debarwa catchment in Eritrea. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:05001. DOI: 10.1051/e3sconf/20199705001
39. Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V. Statistical and spatial variability of climate data in the Mareb-Gash river basin in Eritrea. *Vestnik MGSU* [[Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(1):85-99. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.85-99 (rus.).
40. Bashar K.E. Gash river flash floods challenges to Kassala town: Mitigation and risk management. *Sudan Eng. Soc. J.* 2011; 57(1).
41. Elhassan E.S.E., Ibrahim A.M., Ibrahim Abdalla A. Flood Modeling Water Appraisal and Land Reclamation: A Case Study of Gash River. *SUST J. Eng. Comput. Sci.* 2015; 16(3):37-45.
42. Auerbach D.A., Easton Z.M., Walter M.T., Flecker A.S., Fuka D.R. Evaluating weather observations and the Climate Forecast System Reanalysis as inputs for hydrologic modelling in the tropics. *Hydrological Processes*. 2016; 30(19):3466-3477. DOI: 10.1002/hyp.10860
43. Dile Y.T., Srinivasan R. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 2014; 50(5):1226-1241. DOI: 10.1111/jawr.12182
44. Fuka D.R., Walter M.T., Macalister C., DeGaetano A.T., Steenhuis T.S., Easton, Z.M. Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrological Processes*. 2014; 28(22):5613-5623. DOI: 10.1002/hyp.10073
45. Mahto S.S., Mishra V. Does ERA-5 outperform other reanalysis products for hydrologic applications in India? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2019; 124(16):9423-9441. DOI: 10.1029/2019jd031155
46. Zhu Q., Xuan W., Liu L., Xu Y.P. Evaluation and hydrological application of precipitation estimates derived from PERSIANN-CDR, TRMM 3B42V7, and NCEP-CFSR over humid regions in China. *Hydrological Processes*. 2016; 30(17):3061-3083. DOI: 10.1002/hyp.10846

47. Madsen H., Wilson G., Ammentorp H.C. Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*. 2002; 261(1-4):48-59. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00619-9

48. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 1970; 10(3):282-290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6

Received May 1, 2019

Adopted in a revised form on May 24, 2020.

Approved for publication June 26, 2020

BIONOTES: Anghesom A. Ghebrehiwot — teacher of the Hamelmalo Agricultural College, **National Higher Education and Research Institute**; Keren-397, Keren, Eritrea; postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydrotechnical Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; bahghi2012@gmail.com;

Dmitriy V. Kozlov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 5878-6674; Scopus 36787104800, ResearcherID: B-4808-2016, ORCID: 0000-0002-9440-0341; KozlovDV@mgsu.ru.

ЛИТЕРАТУРА

1. McGlynn B.L., Blöschl G., Borga M., Bormann H., Hurkmans R., Komma J., Nandagiri L. et al. A data acquisition framework for runoff prediction in ungauged basins // *Runoff Prediction in Ungauged Basins*, 2013. Pp. 29–52. DOI: 10.1017/cbo9781139235761.006

2. Wheeler H., Sorooshian S., Sharma K.D. *Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas*. New York : Cambridge University Press, 2008.

3. Sivapalan M., Takeuchi K., Franks S.W., Gupta V.K., Karambiri H., Lakshmi V. et al. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences // *Hydrological Sciences Journal*. 2003. Vol. 48. Issue 6. Pp. 857–880. DOI: 10.1623/hysj.48.6.857.51421

4. Refsgaard J.C., Abbott M.B. *The Role of Distributed Hydrological Modelling in Water Resources Management*. Distributed Hydrological Modelling. Water Science and Technology Library, 1996. Vol. 22. Pp. 1–16.

5. Mokoena M.P., Kapangaziwiri E., Kahinda J.M., Hughes D.A. ECOMAG Model: an evaluation for use in South Africa. WRC Report No. TT 555/13, 2013.

6. Kapangaziwiri E., Hughes D.A., Wagener T. Incorporating uncertainty in hydrological predictions for gauged and ungauged basins in southern Africa // *Hydrological Sciences Journal*. 2012. Vol. 57. Issue 5. Pp. 1000–1019. DOI: 10.1080/02626667.2012.690881

7. Hughes D.A. Three decades of hydrological modelling research in South Africa // *South African Journal of Science*. 2004. Vol. 100. Pp. 638–642.

8. Tegegne G., Park D.K., Kim Y. Comparison of hydrological models for the assessment of water resources in a data-scarce region, the Upper Blue Nile River Basin // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2017. Vol. 14. Pp. 49–66. DOI: 10.1016/j.ejrh.2017.10.002

9. Hrachowitz M., Savenije H.H.G., Blöschl G., McDonnell J.J., Sivapalan M., Pomeroy J.W. et al. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB) — a review // *Hydrological Sciences Journal*. 2013. Vol. 58. Issue 6. Pp. 1198–1255. DOI: 10.1080/02626667.2013.803183

10. Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V. Hydrological modelling for ungauged basins of arid and semiarid regions: review // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 8. С. 1023–1036. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1023-1036

11. Montanari A., Young G., Savenije H.H.G., Hughes D., Wagener T., Ren L.L. et al. “Panta Rhei — Everything Flows”: Change in hydrology and society — The IAHS Scientific Decade 2013–2022 // *Hydrological Sciences Journal*. 2013. Vol. 58. Issue 6. Pp. 1256–1275. DOI: 10.1080/02626667.2013.809088

12. Mount N.J., Maier H.R., Toth E., Elshorbagy A., Solomatine D., Chang F.-J. et al. Data-driven modelling approaches for socio-hydrology: Opportunities and challenges within the Panta Rhei Science Plan // *Hydrological Sciences Journal*. 2016. Pp. 1–17. DOI: 10.1080/02626667.2016.1159683

13. McMillan H., Montanari A., Cudennec C., Savenije H., Kreibich H., Krueger T. et al. Panta Rhei 2013–2015: global perspectives on hydrology, society and change // *Hydrological Sciences Journal*. 2016. Pp. 1–18. DOI: 10.1080/02626667.2016.1159308

14. Sherman L.K. *Streamflow from Rainfall by Unit-Graph Method*. Eng. News-Record, 1932. Vol. 108. Pp. 501–505.

15. Nash J.E. The form of the instantaneous unit hydrograph. *International Association of Hydrological Sciences*, 1957. Vol. 45. Issue 3. Pp. 114–121.

16. Horton R.E. The role of infiltration in the hydrologic cycle // *Transactions, American Geo-*

physical Union. 1933. Vol. 14. Issue 1. P. 446. DOI: 10.1029/tr014i001p00446

17. Horton R.E. Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration-capacity // Transactions, American Geophysical Union. 1939. Vol. 20. Issue 4. P. 693. DOI: 10.1029/tr020i004p00693

18. Crawford N.H., Linsley R.K. The synthesis of continuous stream flow hydrographs on a digital computer. California : Tech. Rep. No. 12. 1962.

19. Abbott M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A., O'Connell P.E., Rasmussen J. An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, 'SHE', 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system // Journal of Hydrology. 1986. Vol. 87. Issue 1–2. Pp. 45–59. DOI: 10.1016/0022-1694(86)90114-9

20. Beven K.J., Kirkby M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology // Hydrological Sciences Bulletin. 1979. Vol. 24. Issue 1. Pp. 43–69. DOI: 10.1080/02626667909491834

21. Dawdy D.R., O'Donnell T. Mathematical models of catchment behaviour // Journal of the Hydraulics Division. 1965. Vol. 91. Issue 4. Pp. 123–137.

22. Sugawara M. The flood forecasting by a series storage type model // International Symposium on Floods and their Computation. 1967. Pp. 1–6.

23. Кучмент Л.С. Математическое моделирование речного стока. Ленинград : Гидрометеониздат, 1972. 191 с.

24. Виноградов Ю.Б. Вопросы гидрологии дождевых паводков на малых водосборах Средней Азии и Южного Казахстана. Ленинград : Гидрометеониздат, 1967. 262 с.

25. Leavesley G.H., Lichty R.W., Troutman B.M., Saindon L.G. Precipitation-runoff modeling system: User's manual. US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 83-4238, Reston, 1983. P. 207.

26. Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams J.R. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development // Journal of the American Water Resources Association. 1998. Vol. 34. Issue 1. Pp. 73–89. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x

27. Motovilov Yu.G., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A. ECOMAG -regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. Oslo : Department of Geophysics, University of Oslo P.O. Box 1022 Blindern 0315, 1999. 88 p.

28. Singh V.P., Woolhiser D.A. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology // Journal of Hydrologic Engineering. 2002. Vol. 7. Issue 4. Pp. 270–292. DOI: 10.1061/(asce)1084-0699(2002)7:4(270)

29. Burnash R. The NWS river forecast system-catchment modelling. Computer Models of Watershed Hydrology, Colorado : Water Resources Publications, 1995. Pp. 311–366.

30. Sugawara M. et al. Tank model and its application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin River,

Kitsu River, Sanaga River and Nam Mune. Research Note of the National Research Center for Disaster Prevention, 1974. Pp. 1–64.

31. Bergstrom S. The HBV model. Computer Models in Watershed Modeling, Colorado: Water Resources Publications, 1995. Pp. 443–476.

32. Nielsen S.A., Hansen E. Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis // Hydrology Research. 1973. Vol. 4. Issue 3. Pp. 171–190. DOI: 10.2166/nh.1973.0013

33. Havnø K., Madsen M.N., Dørge J. MIKE-11 a generalized river modelling package. Computer Models of Watershed Hydrology, Colorado: Water Resources Publications, 1995. Pp. 733–782.

34. Refsgaard J.C., Knudsen J. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models // Water Resources Research. 1996. Vol. 32. Issue 7. Pp. 2189–2202. DOI: 10.1029/96wr00896

35. Madsen H. Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives // Journal of Hydrology. 2000. Vol. 235. Issue 3–4. Pp. 276–288. DOI: 10.1016/s0022-1694(00)00279-1

36. Бубер А.Л. Методические подходы к решению задач многокритериальной оптимизации для управления водными ресурсами бассейнов рек в интересах водопользователей агропромышленного комплекса (АПК). М. : Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2018. С. 75–89.

37. Kozlov D.V., Ghebrehiwot A.A. Efficacy of digital elevation and Nash models in runoff forecast // Magazine of Civil Engineering. 2019. Vol. 87. Issue 3. Pp. 103–122. DOI: 10.18720/MCE.87.9

38. Ghebrehiwot A., Kozlov D. GIUH-Nash based runoff prediction for Debarwa catchment in Eritrea // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 05001. DOI: 10.1051/e3sconf/20199705001

39. Гебрехивот А.А., Козлов Д.В. Статистическая и пространственная изменчивость климатических данных в бассейне реки Мареб-Гаш в Эритрее // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 1. С. 85–99. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.85-99

40. Bashar K.E. Gash river flash floods challenges to Kassala town: Mitigation and risk management // Sudan Eng. Soc. J. 2011. Vol. 57. Issue 1.

41. Elhassan E.S.E., Ibrahim A.M., Ibrahim Abdalla A. Flood Modeling Water Appraisal and Land Reclamation: A Case Study of Gash River // SUST J. Eng. Comput. Sci. 2015. Vol. 16. Issue 3. Pp. 37–45.

42. Auerbach D.A., Easton Z.M., Walter M.T., Flecker A.S., Fuka D.R. Evaluating weather observations and the Climate Forecast System Reanalysis as inputs for hydrologic modelling in the tropics // Hydrological Processes. 2016. Vol. 30. Issue 19. Pp. 3466–3477. DOI: 10.1002/hyp.10860

43. Dile Y.T., Srinivasan R. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce

watersheds: an application in the Blue Nile River Basin // JAWRA Journal of the American Water Resources Association. 2014. Vol. 50. Issue 5. Pp. 1226–1241. DOI: 10.1111/jawr.12182

44. Fuka D.R., Walter M.T., Macalister C., De-gaetano A.T., Steenhuis T.S., Easton, Z.M. Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models // Hydrological Processes. 2014. Vol. 28. Issue 22. Pp. 5613–5623. DOI: 10.1002/hyp.10073

45. Mahto S.S., Mishra V. Does ERA-5 outperform other reanalysis products for hydrologic applications in India? // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2019. Vol. 124. Issue 16. Pp. 9423–9441. DOI: 10.1029/2019jd031155

46. Zhu Q., Xuan W., Liu L., Xu Y.P. Evaluation and hydrological application of precipitation estimates derived from PERSIANN-CDR, TRMM 3B42V7, and NCEP-CFSR over humid regions in China // Hydrological Processes. 2016. Vol. 30. Issue 17. Pp. 3061–3083. DOI: 10.1002/hyp.10846

47. Madsen H., Wilson G., Ammentorp H.C. Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models // Journal of Hydrology. 2002. Vol. 261. Issue 1–4. Pp. 48–59. DOI: 10.1016/s0022-1694(01)00619-9

48. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles // Journal of Hydrology. 1970. Vol. 10. Issue 3. Pp. 282–290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6

Поступила в редакцию 1 мая 2019 г.

Принята в доработанном виде 24 мая 2020 г.

Одобрена для публикации 26 июня 2020 г.

О Б А В Т О Р А Х : Анghесом Алемингус Гебрехивот — преподаватель сельскохозяйственного колледжа Хамель-мало; Национальный институт высшего образования и научных исследований; Кэрэн-397, Кэрэн, Государство Эритрея; аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; bahghi2012@gmail.com;

Дмитрий Вячеславович Козлов — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидравлики и гидротехнического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 5878-6674, Scopus: 36787104800, ResearcherID: B-4808-2016, ORCID: 0000-0002-9440-0341; KozlovDV@mgsu.ru.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК 05.23.21

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.1047-1055

Применение модульных конструкций и зданий при проектировании гостиничного комплекса в высокогорных районах (Джилы-Су)

О.А. Тезадова, Н.Н. Коршунова

Российский университет дружбы народов (РУДН); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. На протяжении долгого времени экономика России носит специфический характер. В первую очередь это связано с тем, что страна имеет топливно-сырьевую направленность экономики, вследствие чего обеспечение благосостояния страны зависит, как правило, от таких сфер экономической деятельности, как добывающая промышленность, в частности нефтегазовая и металлургическая. Современные реалии мировой экономики делают упор на сферу услуг, где значительную роль играет туристская деятельность. В наше время туризм является мощной мировой индустрией. За быстрые темпы роста он признан экономическим феноменом столетия. Во многих странах туризм выполняет значительную функцию в формировании ВВП, создании дополнительных рабочих мест, обеспечении занятости.

Материалы и методы. Обозначена проблема недостаточного развития туристской инфраструктуры, к примеру, гостиничных комплексов с широким спектром актуальных услуг, в том числе оздоровительных, на территории РФ, на примере Кабардино-Балкарской Республики (КБР). КБР соединяет в себе все самые важные для современного туризма черты: благоприятные климатические условия, множество достопримечательностей и культурных ценностей. Однако из-за особенностей рельефа при строительстве в условиях высокогорья можно столкнуться с рядом трудностей. Предложено применение модульных конструкций и зданий при проектировании гостиничного комплекса в высокогорных районах.

Результаты. Проведен анализ местности, изучен большой объем фактического материала, сделаны выводы на основе полученных данных о преимуществе использования модульных конструкций при строительстве на подобной местности.

Выводы. Универсальность модульной системы заключается в том, что модули можно объединять в любом направлении, создавая при этом полноценное сооружение, и транспортировать на любые расстояния.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: туризм, гостиничный комплекс, высокогорье, функционально-планировочная организация местности, строительный модуль, вертолет, лечебно-рекреационный центр, военный аэродром, Кабардино-Балкария, Эльбрус, источник, Джилы-Су

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тезадова О.А., Коршунова Н.Н. Применение модульных конструкций и зданий при проектировании гостиничного комплекса в высокогорных районах (Джилы-Су) // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 7. С. 1047–1055. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.1047-1055

Application of modular structures and buildings in the design of a hotel facility in high mountain areas (Gili-Su)

Oksana A. Tezadova, Natalia N. Korshunova

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. For a long time the Russian economy has had a unique nature. This is primarily due to the fact that the country has a fuel and raw materials oriented economy; therefore, the welfare of the country depends, as a rule, on such economic activities as the mining industry, in particular, oil and gas industry and metallurgy. The present-day international economy is focused on the service sector, where tourism plays a significant role. Nowadays, tourism is a powerful international industry. It has been recognized as an economic phenomenon of the century for its rapid growth rate. In many countries, tourism plays a significant role in GDP and its generation; it creates new jobs and generates employment opportunities.

Materials and methods. The problem of the underdeveloped tourist infrastructure, including hotel facilities that should offer a wide range of relevant services, including health improvement in the Russian Federation, is exemplified by Kabardino-Balkaria. Kabardino-Balkaria has every important feature characteristic of modern tourism: good climatic conditions, numerous landmarks and items of cultural property. However, one may face a number of construction problems in this territory due to its terrain. The application of modular structures and buildings in the design of a hotel facility in high mountain areas is proposed.

Results. The analysis of the area has been carried out; a huge amount of factual material has been studied; conclusions have been made on the basis of the advantage of using modular structures in this area.

Conclusions. The universality of a modular system enables modules to be combined in any direction, creating a complete structure transportable at any distance.

KEYWORDS: tourism, hotel facility, highlands, functional planning of an area, construction module, helicopter, medical and recreational centre, military aerodrome, Kabardino-Balkaria, Elbrus, spring, Gili-Su

FOR CITATION: Tezadova O.A., Korshunova N.N. Application of modular structures and buildings in the design of a hotel facility in high mountain areas (Gili-Su). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(7): 1047-1055. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.1047-1055 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Кабардино-Балкарская Республика (КБР) соединяет в себе все самые важные для современного туриста черты: благоприятные климатические условия, красивую природу, множество достопримечательностей и культурных ценностей.

Развитие туризма в Кабардино-Балкарии тесно связано с покорением горы Эльбрус — наивысшей точки Главного Кавказского хребта, а также с всесторонним изучением района. После распада СССР и продолжительной войны в Чеченской Республике туристический сектор в КБР оставался без должного внимания.

Политическая нестабильность и угрозы террористических актов оказались более весомыми аргументами против неисчерпаемых курортных ресурсов и мощного туристического потенциала региона, эффективное использование которого позволит получить значительную экономическую отдачу, соз-

дать дополнительные рабочие места, вовлечь в сферу трудовой деятельности специалистов различного профиля.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе сбора данных был проведен сравнительный анализ внутренних расходов Российской Федерации и США на развитие туризма и прямой вклад в ВВП (рис. 1, 2)¹.

Более детально изучено природное урочище Джилы-Су со знаменитыми целебными источниками, которое находится в КБР на высоте около 2400 м над уровнем моря. Оно расположено на склоне горы Эльбрус. На территории урочища разбросано около 20 целебных источников, температура воды в которых не опускается ниже 22–24 °С. Название «Джилы-Су» переводится как «теплая вода».

¹ World Travel and Tourism Council Data. URL: <https://knowledge.com/WTTC2019/world-travel-and-tourism-council-data>



Рис. 1. Сравнительный график внутренних расходов на развитие туризма в стране

Fig. 1. Comparative graph of domestic tourism expenditures in the country



Рис. 2. Сравнительный график прямых вкладов в ВВП страны

Fig. 2. Comparative graph of direct contributions to the country's GDP

По своим природным целебным качествам данная местность не уступает другим аналогичным местам, но развитие инфраструктуры продвигается очень медленно [1].

Климатические условия, труднопроходимая местность и угрозы оползней являются настоящим вызовом для архитекторов.

На данный момент урочище Джилы-Су не имеет гостиничных баз, больше преобладают самострой, бытовки и вагончики (рис. 3), что не отвечает требованиям безопасности, условиям комфортного отдыха для людей с ограниченными способностями. Поэтому проанализировать архитектурно-планировочную организацию и дать характеристику данной местности невозможно.



Рис. 3. Палаточный лагерь вблизи целебных источников

Fig. 3. Tent camp near healing springs

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Необходимо правильно рассчитать природно-климатические и ландшафтно-географические факторы для корректного выбора места зоны отдыха и функционально-планировочной организации местности.

В межселенных зонах туристские гостиницы включаются в туристские комплексы, которые находятся в туристско-оздоровительных районах. Традиционными туристско-оздоровительными районами являются горно-рекреационные районы, в которых размещаются туристские гостиницы, например, поляна Азау на Кавказе, находящаяся на отметке 2350 м. Здесь подъем на Эльбрус осуществляется по маятниковому или гондольному подъемнику. Склоны Эльбруса — достаточно широкие для катания и содержат трассы разного уровня подготовки. Однако архитектурно-пространственный ансамбль туристских учреждений не вполне функционально полноценен и гармонично сочетается с уникальной природной средой [2].

Пространственная организация туристских баз отличается взаимосвязью их с окружающим ландшафтом². Характер природного ландшафта влияет на выбор приемов взаимосвязи с архитектурой (рис. 4):

1. Вписывание архитектуры в ландшафт или повторение рельефа (образовательный центр СМАРТ в Армении) (рис. 5). В основе идеи проекта лежит здание, которое будет восприниматься как часть ландшафта, органично с ним сосуществовать.

2. Противопоставление ландшафту или рельефу. При этом доминантой в таком случае может быть или ландшафт, или само здание.

3. Подчинение архитектуры ландшафту как гармоническое слияние с ландшафтом или рельефом.

² СП 257.1325800.2016. Здания гостиниц. Правила проектирования. М. : Стандартинформ, 2017.

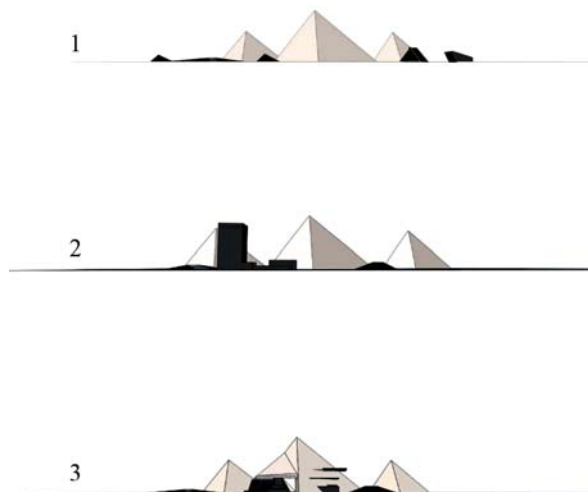


Рис. 4. Приемы взаимосвязи с ландшафтом

Fig. 4. Methods of interaction with the landscape

На архитектурно-планировочную организацию туристских баз в значительной степени оказывают влияние природно-климатические и ландшафтно-географические факторы. Туристские базы должны быть круглогодичными, приближаясь по комфорту к туристским гостиницам.

Это видно на примере Aqua Dome — термального курорта в горах Австрии (рис. 6).

Каждая составляющая важна и самостоятельна, но только в комплексе, соединяясь в одно гармоничное целое, они становятся законченным художественным образом, определив основные функциональные группы помещений и обеспечив требуемые взаимосвязи между ними для функционирования круглый год.

Разнообразная типология горных туристских учреждений обуславливает многообразие архитектуры туристских зданий: от современных упрощен-



Рис. 5. Образовательный центр СМАРТ в Армении

Fig. 5. SMART Education Centre in Armenia

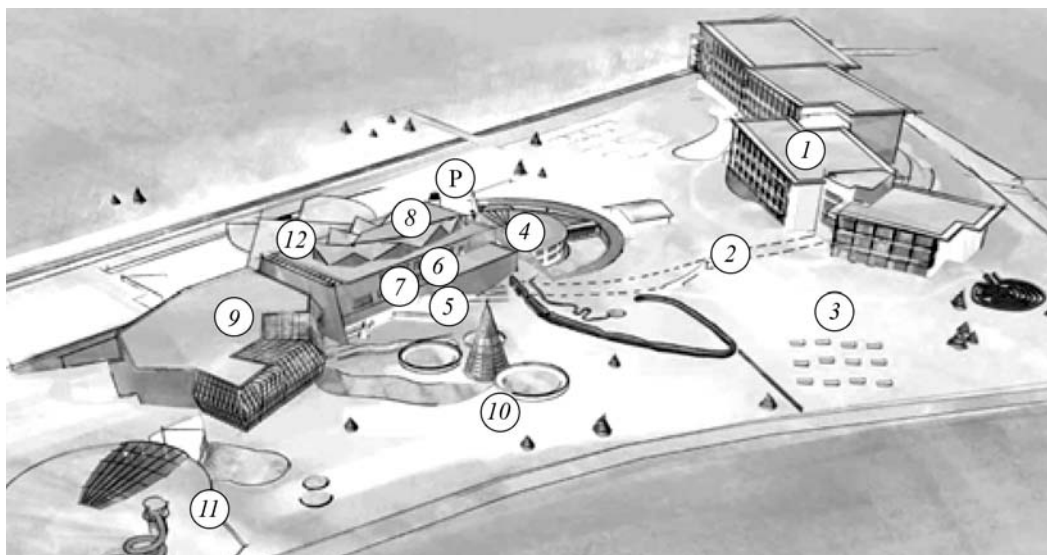


Рис. 6. Термальный курорт в горах Австрии: 1 — гостиница; 2 — коридор купальных халатов — подземный переход из отеля в терму; 3 — гостиничная лужайка для пассивного отдыха; 4 — сауны; 5 — ресторан термального комплекса; 6 — салон красоты и СПА; 7 — фитнес-центр; 8 — СПА 3000; 9 — термальный комплекс; 10 — наружный бассейн; 11 — детская зона отдыха; 12 — вход в термальный комплекс

Fig. 6. Thermal resort in the mountains of Austria: 1 — a hotel; 2 — a corridor of bathrobes — an underground passage from the hotel to the thermal spring; 3 — a hotel lawn for passive recreation; 4 — saunas; 5 — a restaurant; 6 — a beauty parlour and SPA; 7 — a fitness centre; 8 — SPA 3000; 9 — a thermal spring; 10 — an outdoor pool; 11 — a recreation area for children; 12 — the entrance to the thermal spring area

ных или усложненных форм многоэтажных зданий до стилизованных под народную архитектуру домиков, коттеджей, малоэтажных зданий.

Как показывает практика, турбазы круглогодичной эксплуатации имеют типовые архитектурные формы: двух- и пятиэтажные, прямоугольные в плане спальные корпуса, отдельно стоящие или сблокированные с корпусом столовой.

Принцип массового применения типовых проектов туристских баз неприемлем в сфере туризма. Уникальность ансамблей туристских баз, контрастность по отношению к городской застройке, сохранение региональных и национальных черт — основа формирования полноценной среды для отдыха. В связи с этим, сборные модульные здания и конструкции подойдут наилучшим способом. С их помощью можно создать хорошо продуманную функционально-планировочную организацию данной местности, определить взаимосвязь основных функциональных групп помещений.

Планировочное решение участка зависит от технологической последовательности размещения функциональных зон относительно автодороги. Тем самым можно решить проблему в представленном ущелье (Джилы-Су) отсутствия структуры расстановки палаточного лагеря, уличных туалетов, урн.

Данная местность позволяет реализовать различное взаимное расположение функциональных групп помещений, обуславливает разные виды объемно-планировочных структур:

- все функциональные группы помещения располагаются на одном уровне в одном объеме;
- все функциональные группы помещений находятся на одном уровне в разных объемах;
- все функциональные группы помещений размещаются на разных уровнях в одном объеме;
- все функциональные группы помещений располагаются на разных уровнях в одном сблокированном объеме: жилая часть — в объеме, развитом по вертикали, общественная и административная части — в объеме, развитом по горизонтали.

Особенности модульной конструкции

Современные модульные здания могут помочь с проблемой сезонности отдыха в данной местности, так как пригодны для круглогодичного проживания, все панели утепляются специальными строительными материалами в соответствии с климатическими показаниями региона.

Не менее важными особенностями являются: быстрое возведение конструкций в любое время года, возможность строительства на участках с любым ландшафтом даже в самых сложных местах; выбор дизайна по индивидуальным пожеланиям, возможность создавать любой проект; простой монтаж, не нуждающийся в использовании тяжелой техники; возможность точно рассчитать все затраты.

Современная объемно-модульная технология предусматривает возведение домов из нескольких крупных секций, в которых еще на производстве выполнены внутренние и фасадная отделки, про-



Рис. 7. Топографическая отметка военного аэродрома ущелья Джилы-Су

Fig. 7. The survey mark-up of the military aerodrome in the Gili-Su gorge

ведены электрокабели, трубы водоснабжения и канализации, вставлены окна и двери, смонтировано сантехническое и осветительное оборудование. Остается доставить модули на объект, установить на готовый фундамент и состыковать.

Еще один большой плюс модульных зданий — в том, что они не нуждаются в мощном основании. Достаточной для таких построек несущей способностью обладают сравнительно недорогие бетонные подушки, а рассматриваемый регион преобладает скалистыми грунтами.

Урочище Джилы-Су имеет интересную особенность, как старый военный немецкий аэродром [3] (рис. 7), что позволит использовать вертолетную силу для строительства зданий и сооружений в данной местности. Исходя из этих сведений, было принято решение использовать модульные конструкции в регионе^{3, 4}.

На примере проекта гостиничного комплекса с медицинской инфраструктурой в Краснодарском крае (г. Сочи, р-н Адлерский, с. Чвижепсе) можно организовать лечебно-оздоровительный гостиничный комплекс с учетом всех особенностей исследуемой местности (ущелье Джилы-Су).

Представлена схема генплана с обозначением зданий, сооружений, основных транспортных и пе-

шеходных путей (рис. 8, 9). На территории имеются общественная зона и зона питания, жилая, оздоровительная зоны, каждая из которых может быть представлена в виде модульной системы.

Идея гостиницы в данном комплексе заключается в максимальном «вхождении» здания в природный контекст, уходе от привычных форм функционального назначения здания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исходя из топографических и геологических особенностей указанной местности, следует вывод, что применение модульных зданий поможет решить ряд проблем, одной из которых является функционально-планировочная организация местности.

Преимущества модульных зданий:

- срок изготовления и сборки модульного дома, в зависимости от сложности проекта, занимает от 2-х дней до 2-х месяцев, что значительно превышает период возведения аналогичного строения из отдельных стройматериалов;
- мобильность — модульное здание может быть демонтировано, перевезено и установлено на новом месте без ущерба основной конструкции;
- бесфундаментная установка — если позволяют конструктивные особенности и модульные дома, ландшафт, на котором планируется монтаж модульного дома, можно обойтись без закладки фундамента;
- невысокая стоимость;
- простота реконструкции — при необходимости расширения или перепланировки модульные дома могут относительно легко приобрести новый облик путем добавления или замены блоков;
- отсутствие строительного мусора, поддержание экологического фона в регионе.

³ СП 135.13130.2012. Вертодромы. Требования пожарной безопасности. М.: ВНИИПО МЧС России, 2013. СП 121.13330.2012 Аэродромы. Актуализированная редакция СНиП 32-03-96 / Электронный текст документа подготовлен АО «Кодекс» и сверен по: официальное издание М.: Минрегион России, 2012 (rus).

⁴ СП 121.13330.2012. Аэродромы. Актуализированная редакция СНиП 32-03-96. М.: Минрегион России, 2012.

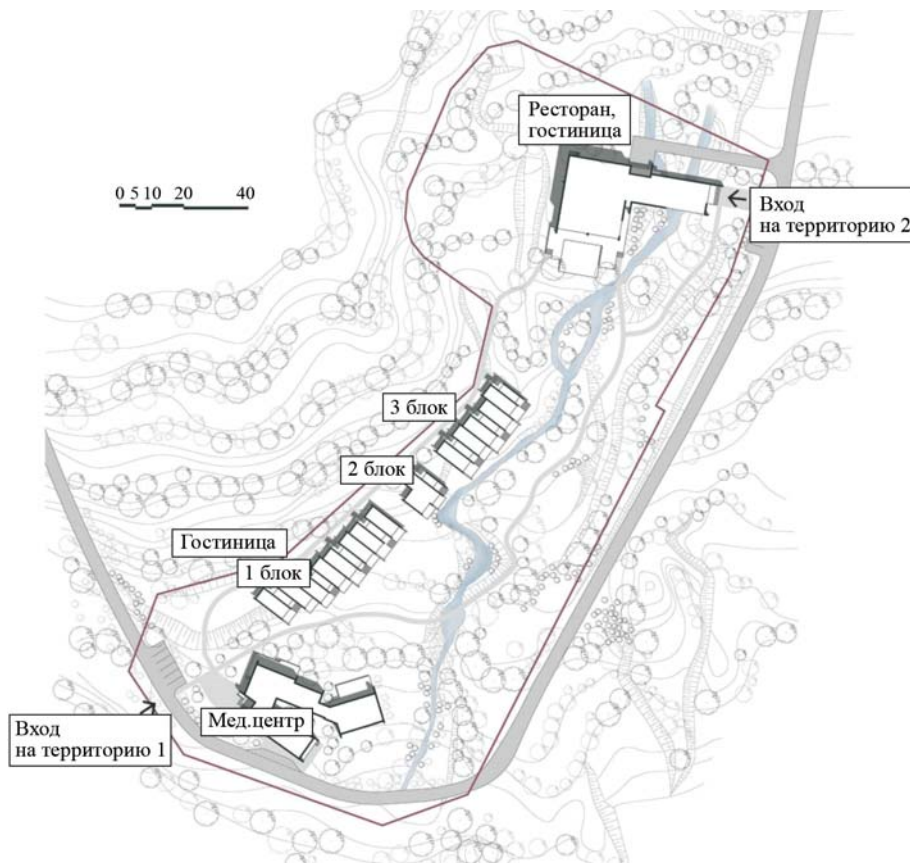


Рис. 8. Гостиничный комплекс в г. Сочи

Fig. 8. The hotel facility in Sochi

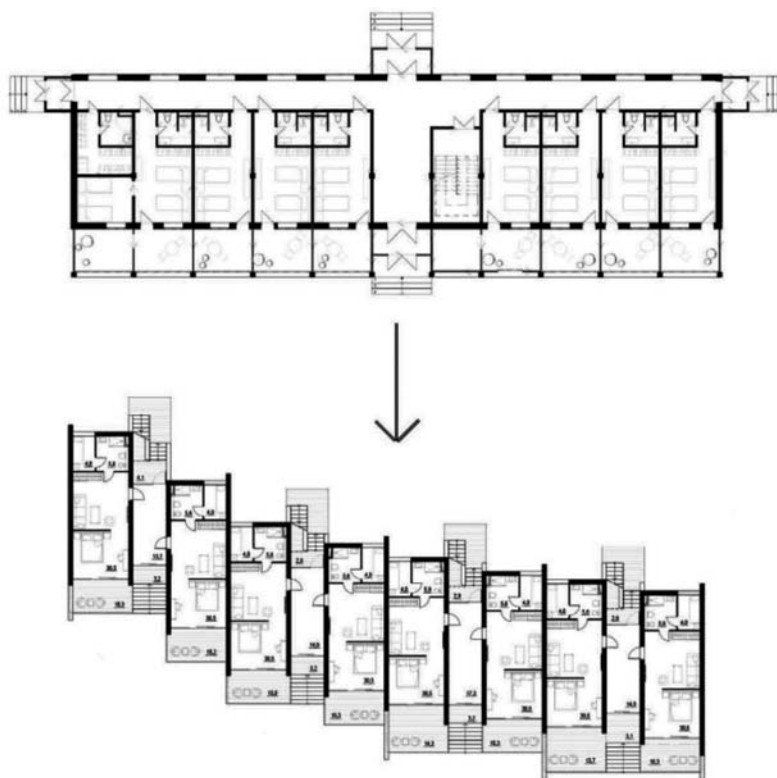


Рис. 9. Гостиничный комплекс в г. Сочи

Fig. 9. The hotel facility in Sochi

ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонова В.Б. Государственная политика в сфере туризма: правовой аспект // Туризм и культурное наследие: межвузовский сб. научных трудов. Вып. 1. URL: http://tourlib.net/statti_tourism/bessonova.htm
2. Гранев В.В., Келасьев Н.Г. Новый этап развития проектирования, строительства и реконструкции производственных зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 5. С. 34–37.
3. Воскресенский В.Ю. Международный туризм: учебное пособие. М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2006. 255 с.
4. Котлярова М., Котляров В. Живописная Кабардино-Балкария: занимательное путешествие с авторами и героями книг по республике, которую называют жемчужиной Кавказа. Нальчик : Полиграфсервис и Т, 2011. 409 с.
5. Генералов В.П., Петрова Е.А., Чернышева И.В. Мини-жилье как типологический элемент жилой ячейки // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и дизайн: сб. статей. Самара : Самарский гос. арх.-строит. ун-т, 2016. С. 74–79.
6. Сычев С.А. Прогнозирование инновационных решений и технологий полносборного строительства // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 1 (54). С. 97–102.
7. Туснина В.М. Перспективы строительства доступного и комфортного жилья на основе стальных каркасов // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 6. С. 43–46.
8. Олейник П.П., Бродский В.И. Организация строительства как вид работ, влияющих на безопасность объектов // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 7. С. 71–75.
9. Жукова Л.Г. Модульные здания // Инновационная наука. 2017. № 12. С. 211–215.
10. Панфилов А.В. Мобильное жилище. Анализ эволюции и направлений дальнейшего развития // Объединенный научный журнал. 2008. № 7. С. 58–62.
11. Радыгина А.Е., Пермяков М.Б. Концепция модульных быстровозводимых общественных зданий // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2014. Т. 2. С. 48–49.
12. Веркалец И.М. Принципы и методы архитектурно-планировочной организации рекреационных ландшафтов с учетом эстетики природной окружающей среды // Архитектура и современные информационные технологии. 2014. № 1 (26). С. 13. URL: <http://marhi.ru/AMIT/2014/1kvart14/verkalets/abstract.php>
13. Складченко Ю.В. Функционально-планировочная структура жилых и общественных зданий с учетом требований людей с инвалидностью. Киев : Архитектура зданий и сооружений, 2005. 18 с.
14. Траутвейн С.Ф. Роль архитектуры в формировании полноценной среды жизнедеятельности. «Безбарьерная архитектурная среда». URL: <http://www.ais.siberia.net/2002/1-2-2002/4.htm>
15. Арнхейм Р. Искусство и визуальное восприятие. М. : Прогресс, 1974. 392 с.
16. Бархин Б.Г. Методика архитектурного проектирования. М. : Стройиздат, 1982. 224 с.
17. Благовещенский Ф.А., Букина Е.Ф. Архитектурные конструкции. М. : Архитектура-С, 2011. 232 с.
18. Шевченко О.Ю., Калитвенцева А.А. Влияние экологических факторов на стоимость недвижимости // Экономика и экология территориальных образований. 2015. № 4. С. 60–63.
19. Мурашкин Г.В., Мордовский С.С. Применение диаграмм деформирования для расчета несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов // Жилищное строительство. 2013. № 3. С. 38–40.
20. Лицкевич В.К. Жилище и климат. М. : Стройиздат, 1984. С. 31–53.

Поступила в редакцию 17 февраля 2019 г.

Принята в доработанном виде 4 марта 2020 г.

Одобрена для публикации 26 июня 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Оксана Артуровна Тезадова — магистр Инженерной академии; Российский университет дружбы народов (РУДН); 115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3; Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-4355-6853; tezadova_tt@mail.ru;

Наталья Николаевна Коршунова — кандидат архитектуры, старший преподаватель департамента архитектуры; Российский университет дружбы народов (РУДН); 115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3; РИНЦ ID: 613885; korshunova_nn@rudn.university.

REFERENCES

1. Bessonova V. B. State policy in the sphere of tourism: legal aspect. *Tourism and cultural heritage: Intercollegiate collection of scientific papers*. URL: http://tourlib.net/statti_tourism/bessonova.htm (rus.).
2. Granev V.V., Kelasyev N.G. A new stage of development of design, construction and reconstruction of production buildings and facilities. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 5:34-37. (rus.).
3. Voskresenskiy V.Yu. *International tourism: a training manual*. Moscow, UNITY-DANA, 2006; 255. (rus.).
4. Kotlyarova M., Kotlyarov V. *Picturesque Kabardino-Balkaria: an entertaining journey with the authors and heroes of books in the republic, which is called the pearl of the Caucasus*. Nalchik, Polygraph-service and T, 2011; 409. (rus.).
5. Generalov V.P., Petrova E.A., Chernysheva I.V. Mini-housing as a typological element of a residential cell. *Traditions and innovations in construction and architecture. Architecture and design: collection of articles*. Samara, Samara State University of Architecture and Civil Engineering, 2016; 74-79. (rus.).
6. Sychev S.A. Forecasting of innovative solutions and technologies of prefabrication construction. *Bulletin of Civil Engineers*. 2016; 1(54):97-102. (rus.).
7. Tusnina V.M. Prospects of construction of affordable and comfortable housing on the basis of steel frameworks. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 6:43-46. (rus.).
8. Oleynik P.P., Brodsky V.I. Construction management as a type of works affecting safety of facilities. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 7:71-75. (rus.).
9. Zhukova L.G. Modular buildings. *Innovation science*. 2017; 12:211-214 (rus.).
10. Panfilov A.V. Mobile housing. Analysis of evolution and directions of further development. *United Scientific Journal*. 2008; 7:58-62. (rus.).
11. Radygina A.E., Permyakov M.B. Concept of modular fast-built public buildings. *Actual Problems of Modern Science, Technology and Education*. 2014; 2:48-49. (rus.).
12. Verkalets I.M. Principles and methods of architectural design recreational landscapes with regard to aesthetics natural environment. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2014; 1(26):13. URL: <http://marhi.ru/AMIT/2014/1kvart14/verkalets/abstract.php> (rus.).
13. Sklyarenko Yu.V. *Functional and planning structure of residential and public buildings taking into account the requirements of people with disabilities*. Kiev, Architecture of buildings and structures, 2005; 18. (rus.).
14. Trautwein S.F. *Role of architecture in the formation of a complete life environment*. Barrier-free architectural environment. URL: <http://www.ais.siberia.net/2002/1-2-2002/4.htm> (rus.).
15. Arnheim R. *Art and visual perception*. Moscow, Progress, 1974; 392. (rus.).
16. Barkhin B.G. *Methodology of architectural design*. Moscow, Stroyizdat, 1982; 224. (rus.).
17. Blagoveshchenskiy F.A., Bukina E.F. *Architectural structures*. Moscow, Architecture-S, 2011; 232. (rus.).
18. Shevchenko O.Yu., Kalitventseva A.A. Influence of environmental factors on the cost of real estate. *Economics and Ecology of Territorial Formations*. 2015; 4:60-63. (rus.).
19. Murashkin G.V., Mordovskiy S.S. Using Deformation Diagrams for Bearing Capacity Calculation of Off-Center Compressed Reinforced Concrete Elements. *Housing Construction*. 2013; 3:38-40. (rus.).
20. Litskevich V.K. *Housing and climate*. Moscow, Stroyizdat, 1984; 31-53. (rus.).

Received November 26, 2019

Adopted in a revised form on March 4, 2020

Approved for publication June 26, 2020

BIONOTES: **Oksana A. Tezadova** — master of Engineering Academy; **Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)**; 3 Ordzhonikidze st., Moscow, 115419, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4355-6853; tezadova_tt@mail.ru;

Natalia N. Korshunova — Candidate of Architecture, senior lecturer of the Department of architecture; **Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)**; 3 Ordzhonikidze st., Moscow, 115419, Russian Federation; ID RISC: 613885; korshunova_nn@rudn.university.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ. ДИСКУССИИ И РЕЦЕНЗИИ. ИНФОРМАЦИЯ

Защитники отечества нашего Defenders of our fatherland

С.И. Рогачко

*доктор технических наук, профессор, выпускник факультета гидротехнического строительства
МИСИ имени В.В. Куйбышева 1971 года; Независимый исследователь; Одесса, Украина*

В преддверии праздника Победы в юбилейный 75-й год захотелось вспомнить мне всех ветеранов Великой Отечественной войны (ВОВ), которые учили не одно поколение студентов в родном, знаменитом на всю страну, строительном институте, и не просто вспомнить, но и перечислить по именам. На факультете гидротехнического строительства Московского инженерно-строительного института готовили инженеров-гидротехников различных специальностей. Профессора и доценты факультета были известными в Советском Союзе учеными. Без их непосредственного участия не начинались как проекты сложных гидротехнических сооружений и их комплексов, так и строительство. Многие из них участвовали в ВОВ. Сражаясь на различных фронтах, они внесли свою неоценимую лепту в освобождение не только нашей страны.

Все мои однокурсники никогда не забудут своих учителей, прошедших суровое и кровавое горнило страшной войны. Некоторые из них закончили институты до войны и успели закрепить и приумножить свои знания в науке, в проектных институтах и на производстве. Другие же были вынуждены прервать учебу и пойти воевать, а доучивались уже после войны. Среди наших учителей были и те, кто служил в инженерных войсках различных родов войск. Более старшему поколению досталось воевать и в Первой мировой войне.

Начну с *Сергея Григорьевича Ефимова*, родившегося в конце позапрошлого века и воевавшего в царской армии летчиком-истребителем. В одном из боев его самолет был сбит, а он — тяжело ранен. В пору моих студенческих лет Сергей Григорьевич, кандидат технических наук, доцент, был сотрудником кафедры производства и организации гидротехнических работ. По всей вероятности, он окончил Санкт-Петербургский институт инженеров путей сообщения и с первых дней ВОВ

принимал участие в строительстве заводов оборонного значения в глубоком тылу.

Работая мастером в Плавстройотряде № 1 в г. Новороссийске на строительстве причалов Широкого пирса № 2, я познакомился с ним, когда он приехал контролировать производственную практику вьетнамских студентов гидротехнического факультета МИСИ. Это знакомство и предопределило мой окончательный выбор вуза для дальнейшей учебы по уже избранной специальности. Сергей Григорьевич дожил до почтенных лет, его лекции изобиловали примерами из личной богатой строительной практики. К концу своей жизни он написал учебник по организации и производству гидротехнических работ при строительстве воднотранспортных сооружений, который я рекомендую для изучения и нынешним студентам XXI века.

Бережно хранится в памяти моей и светлый образ *Петра Алексеевича Навроцкого* — выпускника Ленинградского института инженеров путей сообщения. Вся его производственная жизнь связана с транспортными гидротехническими сооружениями: Комсомольск-на-Амуре, о. Сахалин, порты на Черном море. Во время войны, в звании подполковника инженерных войск, он руководил ремонтом берегозащитных сооружений в г. Ялте в 1944 г. перед исторической встречей лидеров СССР, США и Великобритании. О том, как идут работы в этом направлении, Петр Алексеевич лично докладывал ежедневно И.В. Сталину. Об этом я узнал, когда под его руководством готовил доклад на студенческую научную факультетскую конференцию. Окончательное слушание моего доклада перед презентацией происходило в подмосковных Химках, где проживал Петр Алексеевич. Он был постоянным членом Технического совета «Главморречстроя» Министерства транспортного строительства СССР, участвовал в принятии важных технических решений, в том числе каса-

ющихся внедрения новейших конструкций портовых гидротехнических сооружений в инженерную практику.

Студентам нашего факультета он организовывал демонстрацию документальных фильмов о строительстве гидротехнических сооружений, о войне и, обязательно, о чем-нибудь прекрасном. Он всегда интересовался делами каждого из нас, по-отечески подбадривал в трудные периоды учебы, а иногда и журил, любил рассуждать о величии нашей гидротехнической специальности, которой посвятил всю свою жизнь.

Петр Алексеевич в пору своей молодости, обладая атлетическим телосложением, выводил на сцену Большого театра коня, когда там ставилась опера А.П. Бородин «Князь Игорь». Он любил классическую музыку, особенно произведения польского композитора Фредерика Шопена.

Моим научным руководителем в незабываемые аспирантские годы был *Август Альфредович Каспарсон*. Его родители — Анна Эрнестовна и Альфред Петрович — были профессиональными революционерами. На своем веку они познали царские ссылки, а позже и сталинские репрессии. В сибирской ссылке Красноярского края в 1916 г. родился мой будущий научный наставник. В юные годы, когда его отец занимал высокую должность в торговом представительстве Советской России в Англии, он учился в одной из школ Лондона, где получил прекрасное начальное образование. А в 30-е годы побывал в статусе сына «врага народа» со всеми вытекающими последствиями. Тем не менее мой учитель был одним из лучших учеников Николая Николаевича Джунковского, основателя кафедры водного хозяйства и морских портов. Он блестяще защитил кандидатскую диссертацию, посвященную исследованиям волновых нагрузок на морские сооружения.

Во время войны Август Альфредович служил в инженерных войсках ВМФ. Однажды он мне рассказал, как принимал участие в восстановлении двух сухих доков в освобожденном Севастополе, ворота которых немецкие саперы взорвали с максимально возможными разрушениями. Чтобы их восстановить, понадобилось создавать шпунтовую перемычку вокруг голов доков, организовывать водопонижение, а затем насухо производить ремонтные работы.

По прошествии многих лет, в 2008 г., пришлось мне с моими уже одесскими коллегами, а также учениками обследовать эти доки на предмет их технического состояния. Работая в архиве технического отдела судоремонтного завода, я обнаружил чертежи, разработанные Августом Аль-

фредовичем, с его на всю жизнь для меня незабываемой, незатейливой подписью. Испытав радость от такой находки, рассказал я аспирантам о своем научном руководителе. Август Альфредович был прекрасным знатоком русской словесности, свободно владел английским и французским языками, мог объясняться на немецком языке, любил художественную литературу, поэзию, театр, музыку. Помню, как в студенческом городке нашего института в подмосковных Мытищах из рук в руки для захватывающего чтения переходила затрепанная книжка без обложки, а значит, и без названия и фамилии писателя. Прочел я ее и решил, на всякий случай, спросить о недостающей информации у своего учителя. Выслушав всего несколько предложений о сюжете, он уверенно озвучил и название романа, и его автора.

Август Альфредович обладал тонким юмором, главный его жизненный вывод состоял в том, что каждый советский человек имеет право молчать. Уже в семидесятые годы позапрошлого века он не один раз предрекал крах и коммунистической партии, и страны, во что в те далекие времена не хотелось просто верить. Но ведь сбылось.

Почитал мой учитель память настоящих ученых, среди них особо выделял знаменитого корабеля Алексея Николаевича Крылова, мог на память цитировать целые абзацы из его известной книги «Мои воспоминания». Под научным руководством Августа Альфредовича на Ученом совете нашего факультета были успешно защищены шесть кандидатских и одна докторская диссертации. Это — целая научная школа, представители которой не изменили научному направлению своего любимого учителя.

Вторым, по научной значимости, моим учителем после смерти Августа Альфредовича в 1979 г. стал *Глеб Николаевич Смирнов*, который родился в 1920 г., воевал на Малой земле, ставшей костью в горле фашистов, наступление которых позорно закончилось в славном и дорогом для меня г. Новороссийске. Бережно чтят горожане память о храбрости командира десантников Цезаре Львовиче Кунникове, под командованием которого был захвачен данный плацдарм, ставший впоследствии стратегически важным.

Глеб Николаевич принимал участие в защите этой знаменитой земли в должности командира саперной роты, а после выздоровления от тяжелого ранения и контузии был переведен для дальнейшей службы в контрразведку. Нрава он был сурового, не терпел неучей, начиная от студентов и заканчивая всеми теми, кто незаслуженно занимал не соответствующие их знаниям и практическому

опыту высокие должности. Он читал студентам курс лекций по океанологии, оградительным сооружениям и спецкурсу, прекрасно разбирался в морском волнении, механике грунтов, производстве гидротехнических работ, под его научным руководством были защищены около десяти кандидатских диссертаций. Я уверен, что его учебник по океанологии, написанный для студентов, изучающих морское гидротехническое строительство, будет востребован еще много десятилетий в вузах России.

Многие результаты исследований учеников Глеба Николаевича вошли в качестве рекомендаций в различные типы нормативных документов, включая и СНиП. Он принимал активное участие в создании Отраслевой научно-исследовательской лаборатории морских нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений при кафедре водного хозяйства и морских портов, названной впоследствии именем основателя кафедры Н.Н. Джунковского. Лаборатория была создана при поддержке в ту пору заместителя министра нефтяной промышленности СССР С.А. Оруджева. Длительное время Глеб Николаевич оставался научным руководителем лаборатории и, непосредственно, многих научно-исследовательских работ. На основании результатов экспериментальных исследований, выполненных научными сотрудниками лаборатории, разрабатывались первые нормативные документы по проектированию морских нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений, необходимых для обустройства морских месторождений углеводородов на континентальном шельфе морей нашей страны.

Довелось мне участвовать в качестве ответственного исполнителя и в международном проекте по научному сопровождению проектирования и строительства мола во Вьетнаме в специализированном порту для приема нефти и отгрузки нефтепродуктов при нефтеперерабатывающем заводе. Научное руководство в данном проекте осуществлял Глеб Николаевич. Венцом нашей с ним работы был выход известной в России компании из совместного с Вьетнамом предприятия, а значит, и из крупного контракта между нашими странами. Отрицательный результат в науке — тоже результат, не могли мы согласиться с неприемлемыми, с точки зрения морской гидротехнической науки, техническими решениями, на которых настаивали вьетнамские специалисты. Учебники Глеба Николаевича не потеряют своей актуальности во времени, поскольку являются классическими. Мне выпала большая удача быть и его учеником, и коллегой одновременно.

Моим руководителем дипломного проекта был доцент нашей кафедры, кандидат технических наук, *Евгений Вячеславович Курлович* — участник войны, офицер-сапер, скромный и порядочный человек, великолепный педагог, заместитель декана факультета. Мои новшества и инициативы в работе над проектом он воспринимал с одобрением, взвешенно и тщательно контролировал результаты расчетов. Он горячо поддержал мое решение продолжить учебу в аспирантуре, радовался моим успехам в ледовых исследованиях, всегда при встречах интересовался делами моих однокурсников, поскольку наша студенческая группа отличалась яркими личностями, преуспевающими в учебе. Главным научным направлением Евгения Вячеславовича была защита морских берегов от разрушения штормовыми волнами.

Не менее значимым моим учителем был участник войны *Борис Федорович Горюнов*, пользовавшийся на нашей кафедре, факультете, институте и в научном мире заслуженным авторитетом. За его плечами также была война и громадный опыт в гидротехническом строительстве, кандидатскую диссертацию он защитил еще до войны. Пригласили работать на кафедру Бориса Федоровича с должности заместителя директора «СоюзморНИИпроекта» по науке. Он был прекрасным расчетчиком гидротехнических сооружений, отлично владел механикой грунтов, строительной механикой, обладал энциклопедическими техническими знаниями, охотно консультировал своих коллег, аспирантов и студентов. Под его председательством проходили на кафедре слушания студенческих исследовательских работ. Получить высокую оценку на экзамене или при защите курсового проекта у Бориса Федоровича считалось большим достижением. Среди его аспирантов были и представители других республик бывшего Советского Союза. Так, два выпускника Одесского института инженеров морского флота В.Д. Костюков и Л.В. Мазуренко защитили под его руководством кандидатские, а затем и докторские диссертации. Первый из них стал заместителем директора «СоюзморНИИпроекта» по науке, а затем заведующим кафедрой водных путей и портов в Московской государственной академии водного транспорта; а второй, после заведования кафедрой гидротехнических сооружений, — ректором Одесского инженерно-строительного института.

Поскольку я пишу, полагаясь исключительно на свою память, то упоминаю в своем повествовании лишь тех ветеранов ВОВ нашего факультета, которые непосредственно читали лекции нашим двум группам морских гидротехников. Курс

речных гидротехнических сооружений излагал нам кандидат технических наук, доцент *Александр Иванович Антипов*, он же руководил и курсовым проектированием по плотинам. Предмет свой он знал досконально, в процессе работы над курсовыми проектами особое внимания уделял девушкам, объясняя это тем, что прекрасной половине человечества намного сложнее постигать технические дисциплины, чем парням. Защищали мы свои курсовые проекты у *Сергея Митрофановича Слиско*, профессора, доктора технических наук, ветерана ВОВ, бывшего десантника, декана гидротехнического факультета.

Сергей Митрофанович, после смерти Михаила Михайловича Гришина, долгие годы возглавлял кафедру речных гидротехнических сооружений, участвовал в разработке нормативных документов, принимал участие в выборе створов всех проектируемых гидроэлектростанций не только в СССР, но и в других странах. После завершения строительства гидроузлов он входил в составы государственных комиссий по их приемке и вводу в эксплуатацию. Сергей Митрофанович — автор нескольких экспериментальных установок, на которых проводили исследования многие его ученики, ставшие впоследствии докторами и профессорами.

На этой же кафедре работал доцент, кандидат технических наук, участник ВОВ, обаятельный и интеллигентный *Владимир Николаевич Поспелов*, который проводил с нашими группами лабораторные работы по водосливным плотинам. Он, с нескрываемым юмором, «восхищался» результатами наших расчетов расходов воды в лабораторном гидравлическом лотке, которые иногда превышали расходы больших рек.

На кафедре гидравлики, в пору моей трудовой деятельности в Отраслевой научно-исследовательской лаборатории морских нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений имени Н.Н. Джунковского, мне довелось сотрудничать с кандидатом технических наук, доцентом *Федором Матвеевичем Долгачевым*. Он прошел всю войну, будучи связистом, вернулся домой целым и невредимым. Имея за плечами производственный опыт, Федор Матвеевич помог нашей лаборатории запустить в работу сложный электрогидравлический привод для экспериментальной установки, которая использовалась для проведения опытов в натуральных условиях при исследовании локального давления льда на опорные части морских сооружений. Он был настоящим умельцем во многих технических делах и, кроме всего прочего, писал замечательные стихи. Многим своим коллегам по работе

он в стихотворной форме дарил юбилейные поздравления с теплыми пожеланиями.

На этой же кафедре ее заведующим был участник ВОВ *Адольф Владимирович Мишуев*, доктор технических наук, профессор, который избирался и деканом факультета гидротехнического строительства после службы в Военно-инженерной академии. Он был блестящим оратором и обладал острым умом, занимался очень важными исследованиями, которые посвящались чрезвычайным ситуациям, связанным с разрушением различных типов сооружений.

На кафедре использования водной энергии трудились ветераны ВОВ, они читали лекции нашим морским группам и запомнились нам как доброжелательные, прекрасно знающие свои предметы педагоги. Это — кандидаты технических наук, доценты *Виктор Алексеевич Орлов* и *Николай Николаевич Аршеневский*.

Не забудется нам и ветеран ВОВ, полковник запаса, кандидат технических наук, доцент *Леонид Иванович Кошелев*, читавший лекции по строительной механике, тщательно проверявший наши расчеты и постоянно утверждавший, что строительная механика является основополагающей наукой для будущих проектантов. Он никогда не повышал голос и в спокойной, рассудительной манере отвечал на вопросы студентов, а на экзаменах никогда не завышал оценки, поэтому его четыре балла были эквивалентны пяти.

Не могу не вспомнить глубоко знающего свой предмет ветерана ВОВ, воевавшего в артиллерии, скромного *Александра Михайловича Корнилова*, читавшего лекции по механике грунтов, основаниям и фундаментам. Он умел весьма доходчиво излагать сложные материалы этой важной для будущих строителей науки.

Мое повествование было бы не полным без упоминания о военной кафедре МИСИ, готовившей офицеров запаса инженерных войск. Заместителем по учебной части был широко известный подполковник, а затем и полковник, общительный *Иван Иванович Варюшин*. Он обладал феноменальной памятью, помнил многих студентов по фамилиям, а сотрудников института и по имени-отчеству, знал на память номера телефонов всех служб, а правила дорожного движения цитировал со ссылкой на соответствующие страницы и абзацы. Не одному выпуску студентов МИСИ запомнились наши военные преподаватели-фронтовики, которые учили нас военным наукам не только в аудиториях, но и на практических занятиях во время лагерного сбора в Ярославской области близ городов Ростова Великого и Борисоглебска. Их, к сожалению, так-

же уже нет среди живущих на этом свете, но светлая память об этих достойных офицерах до конца дней наших будет жить в сердцах многих выпускников Московского инженерно-строительного института. В наши студенческие годы, когда учились и трудились в течение шестидневной недели, ходила шутка, что пять дней в неделю нас учили как проектировать и строить, а один раз в неделю — как взрывать все наземные и подводные объекты.

Нашими любимыми преподавателями были: полковник *Иван Петрович Мудрагей*, полковник *Борис Афанасьевич Хабаров*, полковник *Владимир Григорьевич Бадиль*, полковник *Лев Моисеевич Цытрун*, подполковник *Василий Павлович Курга-*

нов, подполковник *Владимир Васильевич Голубев*, подполковник *Василий Георгиевич Никифоров*, подполковник *Геннадий Николаевич Сычев*. Они учили нас строительству военных дорог, мостов, убежищ, минно-взрывным делам, а также управлению и эксплуатации инженерной техники.

О подвигах, ратных трудах и боевых наградах всех перечисленных мною фронтовиков более подробно можно узнать из армейских архивов, а также от их родственников, бережно хранящих память об этих светлых личностях. Вечная вам память и благодарность от всех ныне живущих, которых вы не только защитили, но и выучили!

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список литературы.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка литературы. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список литературы и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках литературы, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список литературы рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями).

ми), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка литературы редакция рекомендует использовать ресурс *Citethisforme.com*.

ШАБЛОН СТАТЬИ

УДК 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия^{2...}

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению аннотаций.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия^{2...} на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется

представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНиП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке — в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель теплопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Вionotes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

