

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 16 Выпуск 8/2021
Vol. 16 Issue 8/2021

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 16. Выпуск 8
2021**

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

Сквозной номер 153

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 16. Issue 8
2021**

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 формирование открытого информационного пространства для обмена результатами научных исследований и мнениями в области строительства между российскими и зарубежными исследователями; привлечение внимания к наиболее актуальным, перспективным и интересным направлениям строительной науки и практики, теории и истории градостроительства, архитектурного творчества.

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. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@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:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 23-93
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	26.08.2021.
Подписан в свет	31.08.2021.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,17. Тираж 100 экз. Заказ № 156

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, почетный президент, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Заместители главного редактора

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

Вера Владимировна Галишикова, д-р техн. наук, доц., проф. каф. железобетонных и каменных конструкций, проректор, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Редакционная коллегия

Павел Алексеевич Акимов, д-р техн. наук, проф., академик РААСН, ректор, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

Николай Иванович Ватин, д-р техн. наук, проф., проф., федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

Петр Григорьевич Грабовый, д-р экон. наук, проф., зав. каф. организации строительства и управления недвижимостью, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Станислав Емиоло, д-р техн. наук, проф., зав. каф. сопротивления материалов, теории упругости и пластичности, Варшавский технологический университет, инженерно-строительный факультет

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

Сергей Владимирович Кузнецов, д-р физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

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

Николай Павлович Осмоловский, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт системных исследований Польской академии наук, Варшава, Республика Польша

Андрей Будимирович Пономарев, д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

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

Светлана Васильевна Самченко, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры Технологии вяжущих веществ и бетонов, 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

Выпускающий редактор: Анна Александровна Дядичева

Корректор: Любовь Владимировна Светличная

Редактор: Татьяна Владимировна Бердникова

Дизайн и верстка: Ольга Григорьевна Горюнова

Перевод на английский язык: Ольга Сергеевна Конакова

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

Председатель редакционного совета

Александр Романович Туснин, д-р техн. наук., доц., проф. каф. металлических и деревянных конструкций, проректор, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Игорь Андреевич Бондаренко, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р архитектуры, проф., директор, Филиал Федеральное государственное бюджетное учреждение «ЦНИИП Минстроя России» Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства (НИИТИАГ), Москва, Российская Федерация

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

Александр Николаевич Власов, д-р техн. наук, ВРИО директора, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт прикладной механики Российской академии наук», 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

Нина Васильевна Данилина, д-р техн. наук, зав. каф. градостроительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Олег Васильевич Кабанцев, д-р техн. наук, доц., директор научно-технических проектов, проф. кафедры железобетонных и каменных конструкций НИУ МГСУ, 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

Рашид Абдуллович Мангушев, д-р техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, зав. каф. геотехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение выс-

шего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Владимир Львович Мондрус, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РААСН, зав. каф. строительной и теоретической механики, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

Екатерина Владимировна Нежникова, д-р экон. наук, доц., проректор, зав. каф. экономики и управления в строительстве, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Надежда Сергеевна Никитина, канд. техн. наук, проф. каф. механики грунтов и геотехники, старший научный сотрудник, 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

Олег Григорьевич Примин, д-р техн. наук, проф., зам. директора по научным исследованиям, АО «Мосводоканал-НИИпроект», 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

Владимир Ильич Травуш, д-р техн. наук, проф., академик и вице-президент РААСН, зам. генерального директора-главный конструктор, ЗАО «Горпроект», Москва, Российская Федерация

Виктор Владимирович Тур, д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии бетона, Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь; проф., Белостокский технологический университет, Белосток, Республика Польша

Наталья Витальевна Федорова, д-р техн. наук, проф., зав. каф. архитектурно-строительного проектирования, НИУ МГСУ, директор Мытищинского филиала НИУ МГСУ, Мытищи, Российская Федерация

Наталья Николаевна Федорова, д-р физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 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: journals@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 , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency "Informnauka", magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	26.08.2021

Distributed by subscription

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)", 2021

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Vera V. Galishnikova, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Editorial Board

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

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

Petr G. Grabovyy, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

Stanislaw Jemiolo, Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Republic of Poland

Rolf Katzenbach, 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

Sergey V. Kuznetsov, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russian Federation

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

Nikolai P. Osmolovskii, Systems Research Institute, Polish Academy of Sciences, Republic of Poland

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

Svetlana V. Samchenko, 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

Nikolay I. Vatin, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Executive editor: *Anna A. Dyadicheva* **Corrector:** *Lyubov' V. Svetlichnaya*

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova* **Layout:** *Ol'ga G. Goryunova*

Russian-English translation: *Ol'ga S. Konakova*

Chairman of the Editorial Board

Alexander R. Tushin, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

Nina V. Danilina, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Natalya N. Fedorova, Professor, Leading research scientist, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

Nataliya V. Fedorova, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 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

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

Oleg V. Kabantsev, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 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

Rashid A. Mangushev, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation

Vladimir L. Mondrus, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

Ekaterina V. Nezhnikova, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Nadezhda S. Nikitina, 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

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

Vladimir I. Travush, CJSC “Gorproject”, Moscow, Russian Federation

Viktar V. Tur, Brest State Technical University Brest, Republic of Belarus; Bialystok University of Technologies, Bialystok, Republic of Poland

Natalia G. Verstina, 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

Alexander N. Vlasov, Institute of Applied Mechanics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

Н.В. Данилина, А. Маджорзадехвахири

**Analysis situation of urban green space framework in Tehran
(Анализ состояния городского зеленого каркаса в Тегеране)** 975

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

Л.И. Астахова, И.В. Астахов, А.А. Юхнина, А.А. Лимонина

Исследование изменения параметров, влияющих на податливость соединения колонны с фундаментом . . . 986

Л.Р. Гимранов, А.И. Фаттахова

Определение усилия в гибком упоре комбинированной плиты с использованием профилированного настила 997

Н.Н. Трекин, Д.Ю. Саркисов, С.В. Трофимов, В.В. Крылов, Е.Б. Евстафьева

Экспериментально-теоретическое исследование прочности плит на продавливание 1006

В.В. Тур, А.В. Тур, А.А. Лизогуб

Проверка живучести конструктивных систем из сборного железобетона по методу энергетического баланса 1015

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

А.В. Лукьянов, С.М. Орлов, Б.Р. Романенко

Исследование характеристик восходящего вихря циклона и концентрации пыли по его сечению 1034

О.Н. Дьячкова

Принципы стратегического планирования развития «зеленой» инфраструктуры городской среды 1045

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

А.А. Гебрехивот, Д.В. Козлов

**Runoff irrigation practices and challenges in western lowlands of Eritrea
(Орошение аккумулированными ливневыми водами и проблемы управления водными ресурсами
в западных низменностях Эритреи)** 1065

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Н.А. Макиша

Определение модельных величин затрат на канализационных очистных сооружениях в случае применения различных технологических схем очистки 1077

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Л.В. Киевский, Я.И. Киевский

Циклограмма реновации 1088

Требования к оформлению научной статьи 1095

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Nina V. Danilina, Alireza Majorzadehzahiri

Analysis situation of urban green space framework in Tehran 975

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

Lyubov I. Astakhova, Ivan V. Astakhov, Anastasiya A. Yukhnina, Anna A. Limonina

Research of changes in the parameters that affect the rigidity of the column-foundation joints 986

Linur R. Gimranov, Alsou E. Fattakhova

Flexible stop's force determining method in a combined plate using profiled flooring 997

Nikolai N. Trekin, Dmitry Yu. Sarkisov, Sergey V. Trofimov, Vladimir V. Krylov, Elizaveta B. Evstafeva

Experimental and theoretical study of the strength of plates for pressure 1006

Viktor V. Tur, Andrei V. Tur, Aliaksandr A. Lizahub

Checking of the robustness of precast structural systems based on the energy balance method 1015

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Alexander V. Lukyanov, Stanislav M. Orlov, Boris R. Romanenko

Study of the characteristics of the ascending vortex of the cyclone and the concentration of dust along its section 1034

Olga N. D'yachkova

Principles of strategic planning for the development of "green" infrastructure of the urban environment 1045

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Anghesom A. Ghebrehiwot, Dmitry V. Kozlov

Runoff irrigation practices and challenges in western lowlands of Eritrea 1065

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Nikolay A. Makisha

Determination of modeled costs at sewage treatment plants in the case of different sequences of treatment 1077

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Leonid V. Kievskiy, Yakov I. Kievskiy

Renovation cycle diagram 1088

Requirements for research paper design 1095

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).

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

объявляет о возможности подготовки диссертации на соискание ученой степени доктора наук на тему:

«Предельное состояние стальных структурных конструкций».

Конкурсный отбор состоится на заседании Научно-технического совета

НИУ МГСУ 21.09.2021 г. в 14:00.

С порядком проведения конкурсного отбора можно ознакомиться
на официальном сайте НИУ МГСУ (mgsu.ru).

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

УДК 711.4:504.06(55)

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.975-985

Analysis situation of urban green space framework in Tehran

Nina V. Danilina, Alireza Majorzadehzahiri

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

ABSTRACT

Introduction. In recent years, the development of cities and the increase in urban population has upset the balance of urban ecology in Iran. The destruction of agricultural fields and natural areas, as well as changes in the function of urban green spaces have caused environmental problems. Therefore, the main purpose of this study is to investigate the distribution of green space in Tehran with an environmental sustainability approach.

Materials and methods. The research method is applied in terms of purpose and descriptive-analytical in terms of method. Basic information has been obtained through library studies and Tehran Municipality and using GIS, mathematical and statistical methods such as entropy coefficient, Concentration level method, Lorenz curve, Location quotient (L.Q) method, Distribution quotient (D.Q) method distribution of Tehran green space function were analyzed.

Results. The results show the unbalanced and inappropriate spatial distribution of green space and the critical environmental situation in the 22 districts of Tehran. According to the entropy coefficient model, district 18 is the most unbalanced distribution and in contrast, district 2 has the most balanced distribution. The results of the concentration level method based on the value of C obtained for each of the districts showed that districts 4 and 1 with the level of 2.141 and 2.103 have the highest concentration level and other districts have much less concentration level than these districts. The Lorenz curve also indicates that the distribution of urban green spaces in 22 districts of Tehran is different from the uniform distribution, and in some districts, it is higher than the uniform distribution and, in some districts, it is lower, which indicates an unbalanced distribution between the districts. Location quotient (L.Q) method and distribution quotient (D.Q) method also showed that the concentration and density of green space use in different districts of Tehran was inappropriate and unbalanced.

Conclusions. This research show that according to the 8 million population in Tehran, its per capita green space is 16.27 square meters and its distribution is unbalanced in 22 districts. Also districts 1 and 22 with a per capita of 33.85 and 58.67 square meters and having 204 and 77 green spaces in the suitable situation and districts 10 and 11 districts with a per capita of 2.58 and 4.96 and having 51 and 30 green spaces are in the unsuitable situation. And according to the statistical methods used, the green space of the districts has an unbalanced spatial distribution. In the 1990s and 2000s, there was a greater tendency for construction in the northern districts and about 45 % of the city's gardens were destroyed during these years, and most of the destruction occurred in the northern districts.

KEYWORDS: urban green space, spatial distribution, sufficiency, environmental sustainability, GIS, Tehran

FOR CITATION: Danilina N.V., Majorzadehzahiri A. Analysis situation of urban green space framework in Tehran. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(8):975-985. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.975-985 (rus.).

Анализ состояния городского зеленого каркаса в Тегеране

Н.В. Данилина, А. Маджорзадеззахири

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В последние годы развитие городов и рост городского населения нарушили баланс городской экологии в Иране. Цель исследования — изучить состояние зеленого каркаса на примере Тегерана с использованием подхода экологической устойчивости.

Материалы и методы. Применены описательно-аналитические методы с использованием ГИС, математические и статистические инструменты, такие как коэффициент энтропии, метод уровня концентрации, кривая Лоренца, метод коэффициента местоположения (L.Q), метод коэффициента распределения (D.Q) для анализа распределения функции зеленых зон Тегерана. Исходная информация получена посредством натуральных исследований и анализа официальных документов муниципалитета Тегерана.

Результаты. Установлены несогласованное пространственное распределение зеленых зон и критическая экологическая ситуация в 22 округах Тегерана. Согласно модели коэффициента энтропии, округ 18 обладает наиболее несбалансированным распределением, округ 2 — сбалансированным распределением. Применение метода уровня концентрации, основанного на значении C, полученном для каждого из округов, показало, что округа 4 и 1 с уровнем 2,141 и 2,103 обладают самым высоким уровнем концентрации, другие округа — меньшим уровнем концентрации зеленых зон. Кривая Лоренца указывает на неравномерное распределение зеленых зон между округами. Методы L.Q и D.Q также продемонстрировали, что концентрация и плотность использования зеленых зон в различных округах Тегерана неравномерны.

Выводы. Средняя обеспеченность населения Тегерана зелеными зонами составляет 16,27 м² на человека, что соответствует российским нормам, но их распределение в 22 округах несбалансированное, и жители разных округов имеют разные условия доступа к ним. Для округов 1 и 22 обеспеченность — 33,85 и 58,67 м², для округов 10 и 11 — 2,58 и 4,96 м² на человека. Доказана гипотеза, что предложенные методы можно применять для оценки состояния зеленого каркаса. Зеленый каркас Тегерана находится в неудовлетворительном состоянии и не обеспечивает устойчивое развитие территорий города. Объясняется это действиями власти в 1990–2000 гг., когда началась активная застройка города и уничтожение 45 % городских садов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: городские зеленые зоны, пространственное распределение, обеспеченность, экологическая устойчивость, ГИС, статистические методы, Тегеран

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Данилина Н.В., Маджорзадехзахири А. Analysis situation of urban green space framework in Tehran // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 8. С. 975–985. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.975-985*

INTRODUCTION

Green space is one of the most important urban functions. Which is considered as green infrastructure in urban districts and also as one of the most important centers of welfare and recreational services, have an important social, economic and ecological role in cities and a favorable environment for raising children, maintaining comfort and it is an indicator for improving the quality of living space and community development. But the vital importance of green space in today's world is not only because of its recreational and economic values, but also because of its environmental importance. In other words, the most important effect of green space in cities is its environmental function, which increases the biological quality of cities by creating a balance in the metabolism of the city on the one hand and raising the level of beauty on the other. Therefore, the importance and role of urban green space in their life and sustainability and its physical and natural effects on the urban system and its various ecological, economic and social efficiencies cannot be ignored. With this approach, urban green space can be defined as outdoor places with prominent amounts of plant life and the existence of major quasi-natural areas. Green space development should be based on the correct attitude to the environmental and social needs of the city as well as the facilities and capabilities of the city. In this regard, the two categories of sustainable development and improving resource productivity will be at the top of green space development policies. A very important point here is to know the ecological structure and quality of the environment [1–4].

The consequences of urban development and their environmental problems have made the existence of green space and its expansion inevitable forever. Cities, as the center of concentration, activity and life, have no choice but to accept the structure and function of natural systems in order to ensure their sustainability. Urban green spaces as a living and vital part of the morphological structure and the main factor of ecological potential of cities have a fundamental role in the environmental sustainability of cities. In recent centuries, the trend of increasing urban population and, consequently, the expansion of the physical development of the city, has created many problems for urban centers, especially large cities. In our country, the rapid growth in recent decades has been done in such a way that the urban space and

infrastructure required by cities are not equipped accordingly [5, 6]. The main effect that has resulted in the rapid growth of the city is the disruption and inadequacy of the service distribution system, which is generally seen in all cities of Iran. The consequences of urban development and the complexity of today's environmental problems that have affected many urban communities, has made the existence of green space and its expansion more necessary than ever. Today, our living environment is a place where green space is an integral part of the urban structure and should play a key role in urban metabolism and environmental sustainability and be a framework for promoting culture, urban society and individual identity [7–10]. On the other hand, the growth of industry and population growth in cities, has led to commercial construction and the need to create new urban functions to meet the growing needs and housing population gradually reduces the share of green space and urban gardens and thus It has caused environmental pollution. It is worth mentioning that with the increase in the process of destruction of nature, human attention to natural resources has increased and its productivity has replaced respect for nature. In general, the existence of green space and their impact on cities is inevitable, so without it, it is not possible for cities to remain sustainable. The most important effect of green space in cities is temperature adjustment, increase in relative humidity, mild air and dust absorption [11, 12]. Therefore, if green space is necessary as a part of the context of cities as well as part of urban functions, it cannot be separated from the needs of urban society. Therefore, green space should be constructed quantitatively in proportion to the physical volume of the city and its future expansion process so that it can have an effective environmental efficiency as an active green space creation and proper distribution Green space in cities has a significant impact on physical and mental health, social activities, high IQ and increase the ability to work and activity and gives a new and satisfying shape to people's lives. But now, as we see, the urban landscape in many contemporary cities, has been nothing but buildings and towering towers, and man can less relax in escaping the mass of cement, iron, asphalt and enjoy living in cities. In the meantime, as mentioned, proper access to urban green space is one of the issues that play a significant role in the relative guarantee of individual and social health, peace of mind

of citizens and improving the quality of the environment [13–16].

Undoubtedly, green space and urban parks should be considered among the most basic factors of environmental and human sustainability of urbanization today. If they are properly planned, they will have favorable effects on the health of body and soul. Green space, which is part of the appearance of the city, as one of the real phenomena, is one of the first issues that human beings have always been in contact with and will be. The importance of green space in urban environments is such that it is considered as one of the indicators of community development. In the meantime, what seems important is the issue of spatial and spatial distribution of urban green space, which if it is inappropriate, visual, social and environmental anomalies such as improper architectural design, improper plant layout, lack of spaces Proper leisure creates the confusion of the cityscape, inappropriate use of leisure time and lack of proper social interaction [17–19].

Landscapes change because they are the expression of the dynamic interaction between natural and cultural forces in the environment. Cultural landscapes are the result of consecutive reorganization of the land in order to adapt its use and spatial structure better to the changing societal demands. The theory of quality of life is to promote and develop the concepts of quality of people's living environment to provide them with the best ways of life. the development of smart and sustainable city concepts on the basis of social factors that will play the role of the accelerator for ensuring a high quality of life for the population and the urban aspects of sustainable development of smart territories. Thus, the practical implementation of the proposed methods creates a real opportunity to improve the quality indicators of urban life with a complex landscape located in the city, which will directly affect the improvement of people's health [20–23].

In addition to this issue, another major problem in different cities of Iran is the lack of urban green space. Today, when a comparison is made between green space urban planning standards, it is clear that many cities face major shortcomings, as well as inadequate distribution

and unfair distribution, which have created problems in terms of easy access for people. Therefore, city managers in responding to these imbalances need to use new analytical tools and more effort. Therefore, the importance of such issues in special districts and cities such as Tehran is more than other districts. Because human societies in these cities are constantly exposed to the consequences of urbanization and environmental pollution. If we add these cases to environmental stresses such as extreme heat, dust and dry air, then we will realize the importance of green space in such cities Irregular development The city of Tehran and having more facilities and services raises the need for green space more than before. In this city, the increase in population and excessive density of buildings has destroyed the environmental quality and has caused the destruction of these spaces as much as possible. One of the problems of Tehran is the uncoordinated distribution of green space in different districts of the city. Global standards of green space are something around 25–20 square meters for each citizen, while according to unofficial statistics, the per capita green space in our country is about 8–9 square meters. However, in the city of Tehran, this per capita is 9.2 square meters per person, and specifically in district one, the per capita green space in the current conditions is about 3.91 square meters per person. Of course, this figure is not the same in different districts of Tehran for some districts per capita green space is less than the urban standard and for others is more, and this lack of uniform distribution exists not only in the whole districts but also within the areas themselves. At the same time, the same amount has been distributed spatially and spatially, so study and be aware of how the spatial and spatial distribution of green space in district one of Tehran with emphasis on environmental sustainability and with the aim of recognizing existing deficiencies and bottlenecks Such observance of the principle of spatial justice seems necessary.

MATERIALS AND METHODS

Tehran (Fig. 1) with an area of about 730 square kilometers is located between 51 degrees and 8 minutes



Fig. 1. Location of Tehran

to 51 degrees and 37 minutes east longitude and 35 degrees and 34 minutes to 35 degrees and 50 minutes north latitude and in terms of administrative divisions into 22 districts and 119 regions, and 362 neighborhoods. Tehran has hot and dry summers and cold and wet winters. It is most often affected by the Siberian anticyclone. Its temperature rises especially during the cold period of the year and during the nights. The frequency of temperature inversion, especially at altitudes of 5 to 100 meters, increases the city's ability to pollute. In addition, the increase in stagnant air also increases the concern of planners to create healthy living conditions.

This research was analytical-descriptive. In this research, first, using library studies, urban plans and field studies, the desired information has been collected, then to analyze this information and to measure the level of concentration and spatial balance of green spaces in different districts of Tehran, Their distribution quotient between districts and the difference between the distribution of urban green spaces and uniform

distribution are the existing mathematical and statistical methods such as entropy coefficient, concentration level, Lorenz curve, location quotient (L.Q) method and distribution quotient (D.Q) method.

RESULTS OF THE RESEARCH

Situation of green space framework in Tehran

According to the statistics obtained from Tehran Municipality, the total area of the city is 615,621,556.30 square meters, in which 8,938,686 people live. The green space of Tehran, which mostly includes parks and gardens, is 557,308,706 square meters. According to the population of Tehran, the per capita green space is 16.27 square meters per person. In total, there are 2,262 green spaces in Tehran. The green space framework of Tehran includes 7 types of green space, which are shown in Fig. 2.

Also, the situation of each district of Tehran is shown in Table 1 and Fig. 3, 4 and 5.

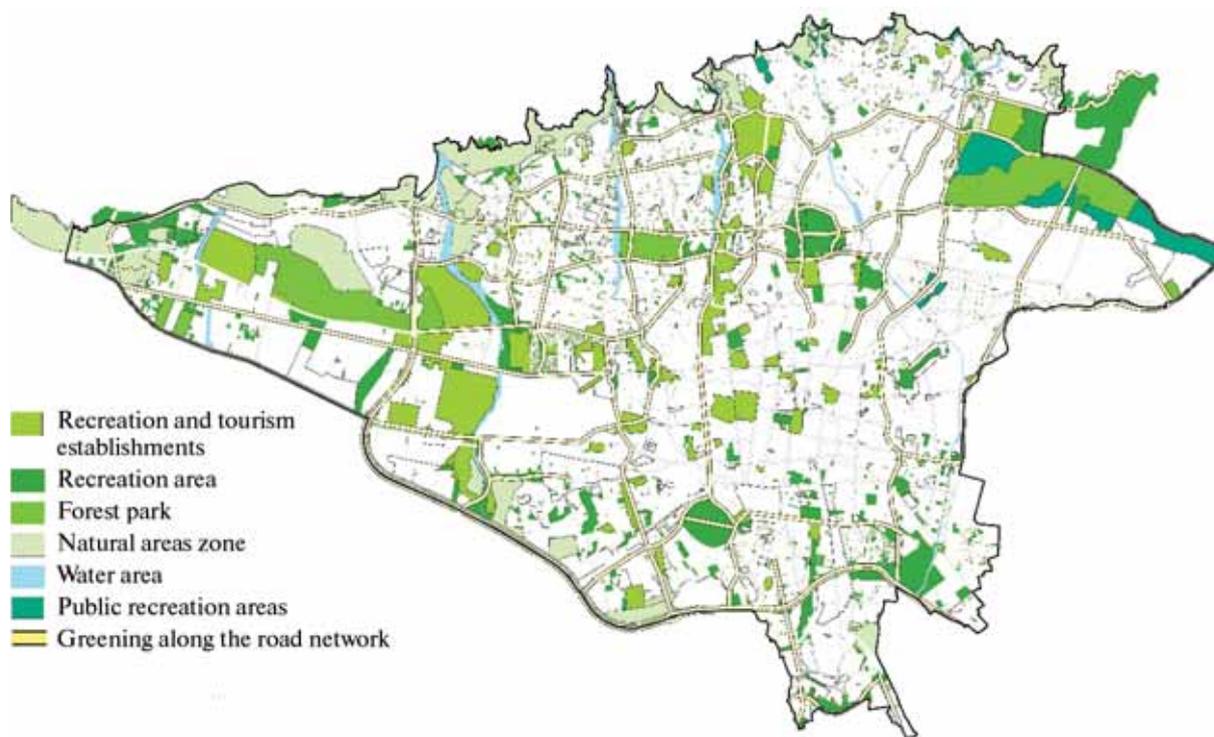


Fig. 2. Current Situation of Tehran Green Space Framework

Table 1. Comparison of population, area and green space of 22 districts of Tehran

Districts	Population	Area, m ²	Green space area, m ²	Green space per capita, m ²
1	522,526	46,610,925.96	16,503,712	33.85
2	721,964	47,005,551.53	14,683,896	20.94
3	337,275	29,217,372.49	5,268,898	15.94
4	946,728	61,554,530.94	20,013,693	21.78
5	884,287	53,161,730.49	12,426,409	14.48
6	259,868	21,367,448.65	3,119,503	12.41

End of the Table 1

Districts	Population	Area, m ²	Green space area, m ²	Green space per capita, m ²
7	312,996	15,335,057.36	1,409,262	4.51
8	445,554	13,156,441.53	1,705,089	4.01
9	180,818	19,746,501.80	2,778,630	15.95
10	336,962	8,185,486.76	843,299	2.58
11	316,492	12,031,225.02	1,527,996	4.96
12	241,430	16,007,300.69	1,375,827	5.69
13	244,516	12,862,735.46	2,203,722	8.85
14	507,783	14,552,730.70	4,775,736	9.26
15	670,574	27,739,822.06	9,835,482	15.34
16	260,178	16,512,495.56	3,076,979	11.46
17	289,234	8,251,824.81	1,062,393	3.89
18	431,276	37,869,105.00	6,648,183	15.83
19	262,316	20,341,440.30	6,856,397	26.27
20	378,741	23,583,689.19	6,798,268	18.61
21	196,998	51,525,286.31	6,864,068	36.74
22	198,970	59,002,853.70	10,346,053	58.67

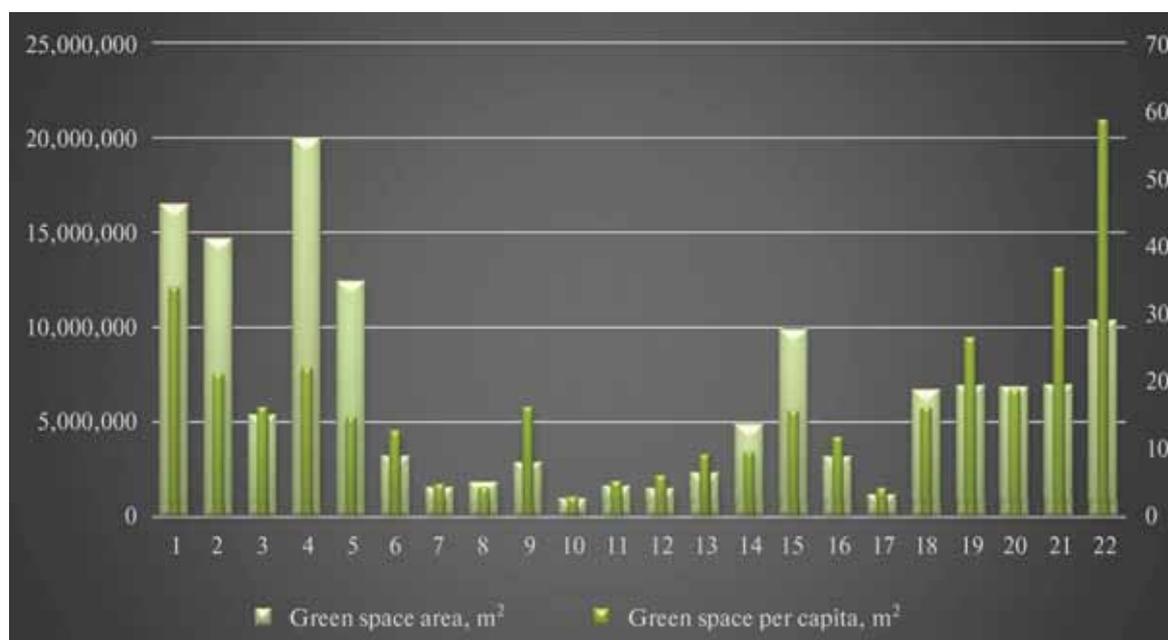


Fig. 3. Green space area of 22 districts of Tehran

As Tables 1 and Fig. 3, 4 and 5 shows, the largest area of green space in Tehran is in district 4 with an area of 20,013,693 square meters and per capita green space is 21.78 square meters. In contrast, the lowest area of green space is related to district 10 with a green space area of 843,299 m² and a per capita green space of 2,058 m². District 22 with a per capita green space of 58.67 square

meters has the highest per capita due to the low population of this district. The highest number of green spaces among the 22 districts of Tehran is in district 4 with 264 and the lowest number is in district 10 with 28 green spaces. To create a suitable urban environment and ensure the welfare of residents, it is necessary to create a balance between the resident population and green space.

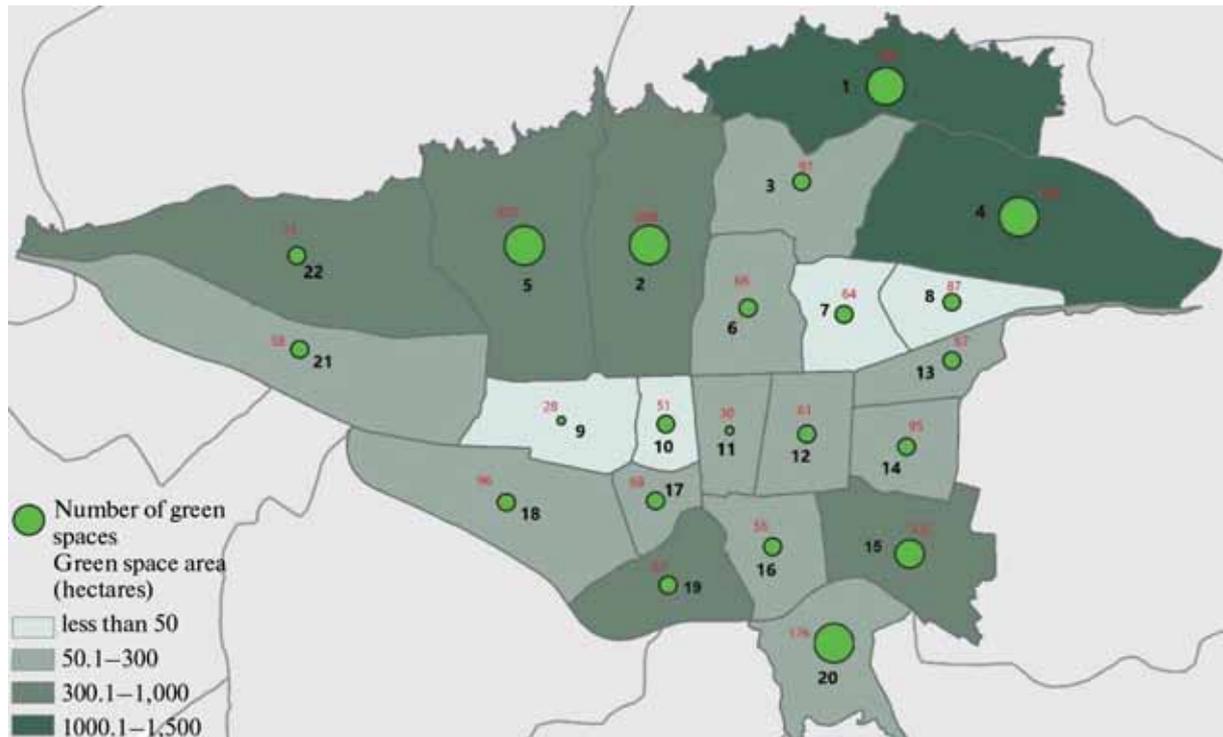


Fig. 4. Number and area of green space in 22 districts of Tehran

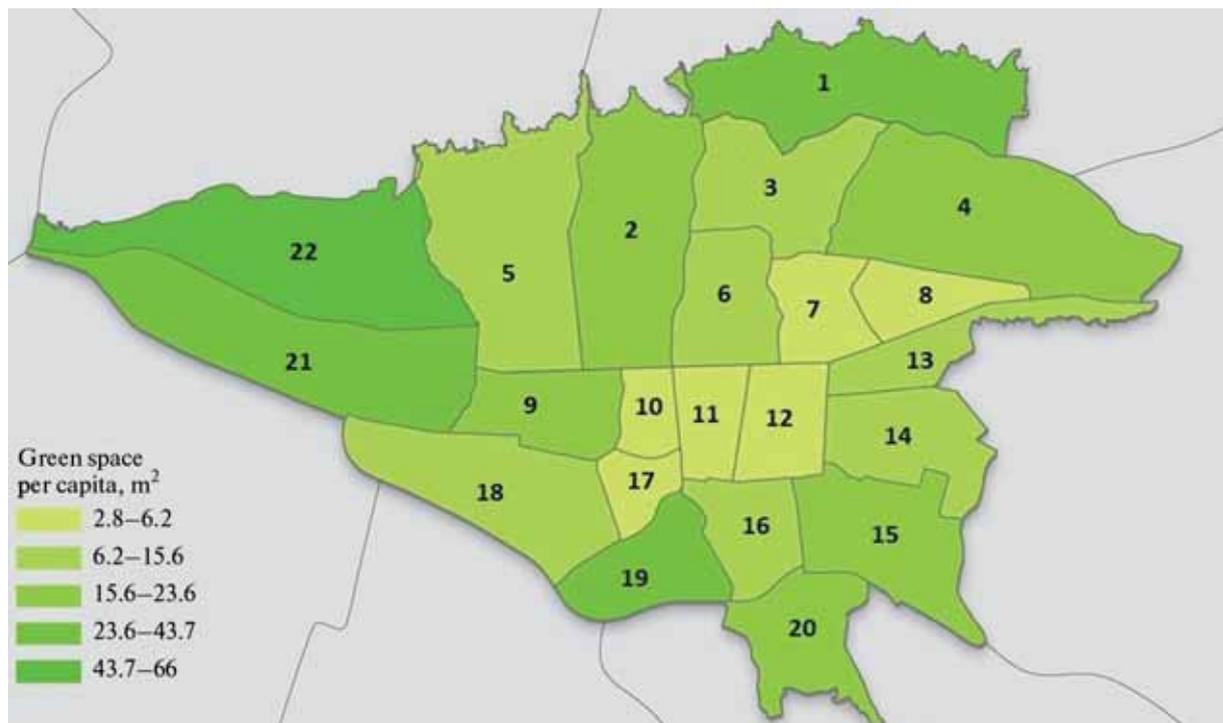


Fig. 5. Sufficiency of green space per capita in 22 districts of Tehran

Entropy coefficient

Through the entropy method to measure the uniformity of the variables; Such as population distribution in districts of a city or public services can be used. According to the theoretical principle of the model, when entropy tends to the number one, the sign

of the existence of spatial balance of a variable and less than the inverse number indicates this state, which is calculated based on the following equation:

$$p_{ij} = \frac{f_j(a_i)}{\sum_{i=0}^n f_j(a_i)} \quad j=1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

$$E_j = -K \sum p_{ij} \ln p_{ij}, \quad (2)$$

$$K = 1/\ln M, \quad (3)$$

where E is the entropy coefficient of each district and P is the ratio of the number of independent variables (green space) divided by the sum of the independent variables. F is the value of the independent variable and K is the constant coefficient. M is the number of calculated variables.

Based on the method, Tables 2 show the distribution of green space in the districts, and the more the coefficient tends to one inclination, the more the balance of services indicates, and the more it tends to zero, the more the inconsistency in distribution of green space at the districts level. Based on the results of entropy index analysis; The spatial distribution of green space use among the 22 districts of Tehran is such that district 18 is the most unbalanced distribution and in contrast, district 2 has the most balanced distribution.

Concentration level method

This technique shows the extent to which an activity is evenly distributed in different parts of an district or territory, or to what extent it tends to Concentration. It therefore provides a comparative image of the position of the study districts relative to each other. The measure-

ment of the spatial distribution of an activity or function is done through the following equation:

$$C = \frac{\sum |X - Y|}{2}, \quad (4)$$

where C is the concentration of an activity or function, X is the percentage distributed of the area of each district, and Y is the percentage distributed of an activity or function in each district. The C value in this technique always fluctuates between zero and one hundred. The higher the amount and calculated, it indicates the inappropriate distribution or the intense concentration of that activity or function in certain points.

The level of C indicates the low concentration of urban green spaces in the 22 districts of Tehran. In order to clarify the analysis of the concentration of green spaces and to know in which district the concentration is more, we calculated this method separately for each district of Tehran. The results of Table 3 show that districts 1, 21, 2, 15, and 22 with the concentration of 2.103, 1.735, 1.421, 1.256, and 1.100 have the highest concentration but in other districts of Tehran Far less common in these districts.

Lorenz curve

This technique is one of the spatial distribution techniques and shows how variables are distributed. This

Table 2. Calculation of entropy coefficient for districts of Tehran

Districts	Entropy coefficient
1	0.648
2	0.681
3	0.450
4	0.465
5	0.450
6	0.406
7	0.446
8	0.440
9	0.233
10	0.372
11	0.489
12	0.479
13	0.315
14	0.123
15	0.358
16	0.493
17	0.434
18	0.106
19	0.221
20	0.540
21	0.319
22	0.409

Table 3. Concentration level of green spaces in 22 districts of Tehran

Districts	Concentration level of green space C , %
1	2.103
2	1.421
3	0.492
4	2.142
5	0.116
6	0.622
7	0.742
8	0.460
9	0.612
10	0.363
11	0.431
12	0.809
13	0.258
14	0.522
15	1.256
16	0.243
17	0.291
18	0.703
19	0.794
20	0.510
21	1.735
22	1.100

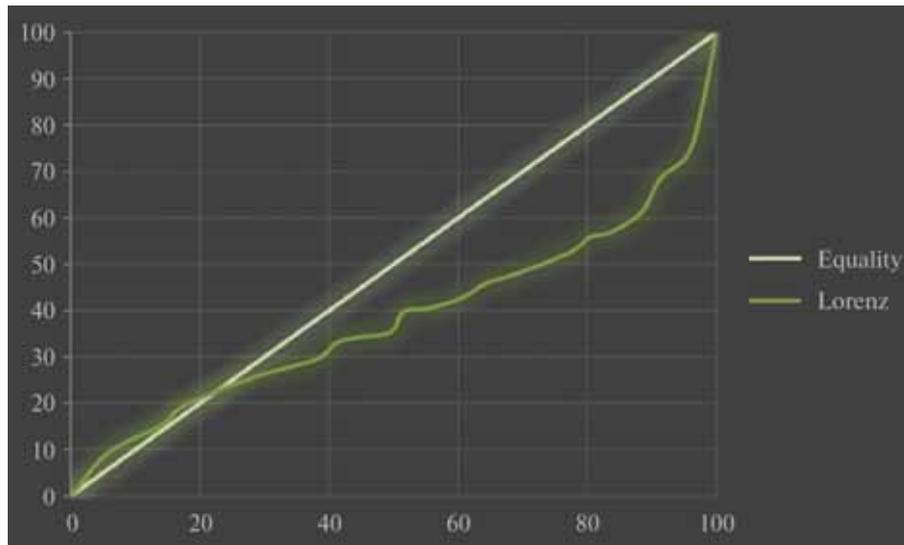


Fig. 6. Lorenz curve for green space distribution in Tehran

curve is a cumulative frequency curve and compares the distribution of the variable in question with a uniform distribution that represents equality. In this curve, the cumulative ratio of the variable (green space) is on the y-axis and the cumulative ratio of the population of the districts is on the x-axis. According to this curve, the farther the curve is from the standard distribution line, the more unbalanced the distribution of the desired variable in a zone will be.

According to Fig. 6, as can be seen, the Lorenz curve shows the difference in spatial distribution of urban green space in 22 districts of Tehran compared to uniform distribution and indicates the fact that the distribution of urban green space in 22 districts is proportional. It is different in uniform distribution and in some districts, it is higher than uniform distribution and, in some districts, it is lower which indicates unbalanced distribution between districts.

Location quotient (L.Q) method

The L.Q method is very useful for calculating the spatial concentration. By this method, it is easy to understand the distribution of the desired variable in urban districts. The L.Q method is a measure designed to determine the relative concentration of a function in one district relative to other districts. That is, it is a method of measuring the relative concentration of a particular district relative to all districts. The equation of method L.Q is:

$$L.Q = (x_i/n_i) / (x/n), \tag{5}$$

where x_i is the number of variables i in the target district, n_i is the population of the district, x is the number of variables in the whole city and n is the population of the whole city. Given an L.Q result smaller than one, this means that the concentration of the desired variable in one district is less than total districts. Equal to or close to one means the self-sufficiency of the district under consideration compared to other districts and is greater

than one indicates the concentration of the desired variable in one district relative to the total districts.

As Table 4 shows, the L.Q calculated in districts 1, 2, 4, 19, 20, 21 and 22 is higher than one and indicates the high concentration of urban green spaces in these districts compared to other districts. In districts 3, 9, 15 and 18 this value is approximately equal to one, which indicates the balance in these districts. In districts 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16 and 17, this value is less than one and indicates the lack of concentration of this function in these districts compared to other districts.

Distribution quotient (D.Q) method

The following equation can be used to measure the distribution quotient of specific production, service or functional spaces:

$$D.Q = Y/X, \tag{6}$$

where D.Q is the distribution quotient, Y is the percentage distribution of the functional spaces of each district and X is the percentage distribution of the area of each district. Based on the distribution quotient calculations, there is a density of spaces or functions in districts where the quotient is more than one.

Table 4. Results of location quotient and distribution quotient for green space in 22 districts of Tehran

Districts	Location quotient (L.Q)	Distribution quotient (D.Q)
1	2.016	1.555
2	1.298	1.372
3	0.997	0.792
4	1.349	1.428
5	0.897	1.026
6	0.766	0.641
7	0.287	0.403

End of the Table 4

Districts	Location quotient (L.Q)	Distribution quotient (D.Q)
8	0.244	0.569
9	0.981	0.618
10	0.159	0.452
11	0.308	0.557
12	0.363	0.377
13	0.575	0.752
14	0.600	1.441
15	0.936	1.557
16	0.755	0.818
17	0.234	0.565
18	0.984	0.771
19	1.669	1.480
20	1.146	1.266
21	2.224	0.585
22	3.320	0.770

To compare with the L.Q method (Table 4), the distribution quotient method for urban green spaces in 22 districts of Tehran was calculated with equation 6 and as we see in Table 4, the distribution quotient of green spaces in districts 1, 2, 4, 5, 14, 15, 19 and 20 is higher than one and indicates the density of green spaces in these districts.

CONCLUSION AND DISCUSSION

Urbanization, is a major cause of environmental change. This approach has been formed as a result of historical-geographical complexities and has caused unbridled urban expansion and destruction of green spaces and agricultural lands and changes in land

functions and has caused the loss of beauty, urban space, nature and objective manifestation of socio-economic problems, has become cultural and ecological, which has not only caused climate change, but also environmental changes and disturbed the ecological balance. The disappearance of urban green spaces as the breathing lungs of cities and the expansion of polluting industries in cities has made the urban environment polluted and uninhabitable. Currently, 22.76 % of the total area of Tehran is dedicated to various types of green space. However, in the 1990s and 2000s, despite the emptiness of the southern and eastern districts of Tehran, there was a greater tendency to build in the northern districts. About 45 % of the city's gardens have been destroyed over the years, with most of the destruction in the north, and the parks created during this period are not comparable in terms of ecological efficiency. According to the population of 8,938,686 people in Tehran, the per capita green space is 16.27 square meters and its distribution in 22 districts of Tehran is unbalanced. District 2 with the highest entropy coefficient, is in the best conditions and district 18 with the lowest entropy coefficient, is in the worst condition. Considering the use of quantitatively different methods, it can be concluded that the distribution of urban green spaces in the 22 districts of Tehran is unbalanced and there is little difference in this regard between the districts so that based on the Lorenz curve the distribution of urban green spaces in the 22 districts of Tehran are different from the uniform distribution, which indicates an unbalanced distribution among the districts. Also, based on the data obtained from different methods in this study, it can be said that only districts 1, 4, 21 and 22 have a suitable situation in terms of urban green space performance and districts 10 and 11 have an unsuitable situation in terms of urban green space performance. According to the results of this research, there is a need for prioritization to improve and develop the urban green space framework of Tehran.

REFERENCES

- Breuste J., Artmann M. Multi-functional urban green spaces. *Cities and Nature*. 2020; 399-526. DOI: 10.1007/978-3-030-37716-8_7
- Javadi R., Nasrollahi N. Urban green space and health: The role of thermal comfort on the health benefits from the urban green space; a review study. *Building and Environment*. 2021; 202:108039. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108039
- Pallotta V.I. The scientific approach of masters of design to the pre-project study of green zones of the urban environment. *Materials of the International Scientific Forum "Education. Science. Culture"*. 2016; 138-142. (rus.).
- Rajput S., Arora K., Mathur R. *Urban Green Space, Health Economics and Air Pollution in Delhi*. 1st ed. Routledge India, 2021. DOI: 10.4324/9780429340581
- Hanson H.I., Eckberg E., Widenberg M., Olsson J.A. Gardens' contribution to people and urban green space. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2021; 63:127198. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127198
- Adams C.E. *Urban Green Spaces*. 3rd ed. CRC Press, 2018; 179-202. DOI: 10.1201/9781315371863-7
- Klyukina A.I., Frolova T.L. Basic principles of organizing urban small green zones. *Architecture and architectural environment: issues of historical and modern development*. 2019; 98-103. (rus.).
- Hall C.M. *Cultural and Heritage Tourism in the Middle East and North Africa*. 1st ed. Routledge, 2020. DOI: 10.4324/9780429279065
- Illia F. Human-Nature Interaction in Urban Green Spaces. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*. 2020; 5:SI3. DOI: 10.21834/ebpj.v5iSI3.2581

10. Whitten M. Contesting Longstanding Conceptualisations of Urban Green Space. *Cities and Nature*. 2020; 87-116. DOI: 10.1007/978-3-030-44480-8_5
11. Kowarik I. Working with Wilderness: a promising direction for urban green spaces. *Landscape Architecture Frontiers*. 2021; 9(1):92. DOI: 10.15302/J-LAF-1-030025
12. Mwendwa P., Giliba R.A. Benefits and Challenges of Urban Green Spaces. *Chinese Journal of Population Resources and Environment*. 2012; 12(1):73-79. DOI: 10.1080/10042857.2012.10685062
13. Bilgili B.C., Gökyer E. Urban Green Space System Planning. *Landscape Planning*. 2020. DOI: 10.5772/45877
14. Arnberger A., Eder R. Are urban visitors' general preferences for green-spaces similar to their preferences when seeking stress relief? *Urban Forestry & Urban Greening*. 2015; 14(4):872-882. DOI: 10.1016/j.ufug.2015.07.005
15. Belmeziti A., Cherqui F., Kaufmann B. Improving the multi-functionality of urban green spaces: relations between components of green spaces and urban services. *Sustainable Cities and Society*. 2018; 43:1-10. DOI: 10.1016/j.scs.2018.07.014
16. Lamond J., Everett G. Sustainable Blue-Green Infrastructure: A social practice approach to understanding community preferences and stewardship. *Landscape and Urban Planning*. 2019; 191:103639. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2019.103639
17. Nikishova T.A. Studying the international experience of organization of green spaces in urban areas. *Northern Palmira*. 2018; 222-226 (rus.).
18. Breuste J., Artmann M., Ioja C., Qureshi S. Making Green Cities. *Cities and Nature*. 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-37716-8
19. Dempsey N., Dobson J. Naturally Challenged: Contested Perceptions and Practices in Urban Green Spaces. *Cities and Nature*. 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-44480-8
20. Antrop M. Why landscapes of the past are important for the future. *Landscape and Urban Planning*. 2005; 70(1-2):21-34. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2003.10.002
21. Vlasov D., Majorzadehzahiri A. Evaluate quality of urban life. *E3S Web of Conferences*. 2021; 26:05035. DOI: 10.1051/e3sconf/202126305035
22. Danilina N., Majorzadehzahiri A. Social factors of sustainability for a smart city development. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 869:022027. DOI: 10.1088/1757-899X/869/2/022027
23. Shukurov I., Majorzadehzahiri A. Dustiness and Aerodynamics of Air in Central Asian Cities. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753:042013. DOI: 10.1088/1757-899X/753/4/042013

Received July 7, 2021.

Adopted in revised form on August 22, 2021.

Approved for publication on August 24, 2021.

BIONOTES: **Nina V. Danilina** — Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 686739, Scopus: 57192377385, ORCID: 0000-0002-9465-6435, ResearcherID: F-2882-2017; DanilinaNV@mail.ru;

Alireza Majorzadehzahiri — PhD student of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1103511, Scopus: 57209311034, ORCID: 0000-0002-9800-8830; alireza_majorzadehzahiri@yahoo.com.

ЛИТЕРАТУРА

1. Breuste J., Artmann M. Multi-functional Urban Green Spaces // *Cities and Nature*. 2020. Pp. 137–143. DOI: 10.1007/978-3-030-37716-8_7
2. Javadi R., Nasrollahi N. Urban green space and health: The role of thermal comfort on the health benefits from the urban green space; a review study // *Building and Environment*. 2021. Vol. 202. P. 108039. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108039
3. Паллотта В.И. Научный подход магистров дизайна к предпроектному исследованию зеленых зон городской среды // *Образование. Наука. Культура: мат. Междунар. науч. форума*. 2016. С. 138–142.
4. Rajput S., Arora K., Mathur R. Urban green space, health economics and air pollution in Delhi. 1st ed. Routledge, India, 2021. DOI: 10.4324/9780429340581
5. Hanson H.I., Eckberg E., Widenberg M., Olsson J.A. Gardens' contribution to people and urban green space // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2021. Vol. 63. P. 127198. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127198
6. Adams C.E. Urban Green Spaces. 3rd ed. CRC Press, 2018. Pp. 179–202. DOI: 10.1201/9781315371863-7
7. Клюкина А.И., Фролова Т.Л. Основные принципы организации городских малых зеленых зон //

Архитектура и архитектурная среда: вопросы исторического и современного развития. 2019. С. 98–03.

8. *Hall C.M.* Cultural and heritage Tourism in the Middle East and North Africa. 1st ed. Routledge, 2020. DOI: 10.4324/9780429279065

9. *Illia F.* Human-Nature Interaction in Urban Green Spaces // *Environment-Behaviour Proceedings Journal*. 2020. 5: SI3. DOI: 10.21834/ebpj.v5iSI3.2581

10. *Whitten M.* Contesting longstanding conceptualisations of urban green space // *Cities and Nature*. 2020. Pp. 87–116 DOI: 10.1007/978-3-030-44480-8_5

11. *Kowarik I.* Working with Wilderness: a promising direction for urban green spaces // *Landscape Architecture Frontiers*. 2021. Vol. 9. Issue 1. P. 92. DOI: 10.15302/J-LAF-1-030025

12. *Mwendwa P., Giliba R.A.* Benefits and challenges of urban green spaces // *Chinese Journal of Population Resources and Environment*. 2012. Vol. 12. Issue 1. Pp. 73–79. DOI: 10.1080/10042857.2012.10685062

13. *Bilgili B.C., Gökyer E.* Urban green space system planning // *Landscape Planning*. 2012. DOI: 10.5772/45877

14. *Arnberger A., Eder R.* Are urban visitors' general preferences for green-spaces similar to their preferences when seeking stress relief? // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2015. Vol. 14. Issue 4. Pp. 872–882. DOI: 10.1016/j.ufug.2015.07.005

15. *Belmeziti A., Cherqui F., Kaufmann B.* Improving the multi-functionality of urban green spaces: relations between components of green spaces and urban services // *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 43. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.scs.2018.07.014

16. *Lamond J., Everett G.* Sustainable blue-green infrastructure: A social practice approach to understanding community preferences and stewardship // *Landscape and Urban Planning*. 2019. Vol. 191. P. 103639. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2019.103639

17. *Нукишова Т.А.* Изучение зарубежного опыта организации зеленых зон в городской среде // *Северная пальмира*. 2018. С. 222–226.

18. *Breuste J., Artmann M., Ioja C., Qureshi S.* Making green cities // *Cities and Nature*. 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-37716-8

19. *Dempsey N., Dobson J.* Naturally challenged: Contested perceptions and practices in urban green spaces // *Cities and Nature*. 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-44480-8

20. *Antrop M.* Why landscapes of the past are important for the future // *Landscape and Urban Planning*. 2005. Vol. 70. Issue 1–2. Pp. 21–34. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2003.10.002

21. *Vlasov D., Majorzadehzahiri A.* Evaluate quality of urban life // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 263. P. 05035. DOI: 10.1051/e3sconf/202126305035

22. *Danilina N., Majorzadehzahiri A.* Social factors of sustainability for a smart city development // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 869. P. 022027. DOI: 10.1088/1757-899X/869/2/022027

23. *Shukurov I., Majorzadehzahiri A.* Dustiness and aerodynamics of air in Central Asian cities // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. P. 042013. DOI: 10.1088/1757-899X/753/4/042013

Поступила в редакцию 7 июля 2021 г.

Принята в доработанном виде 22 августа 2021 г.

Одобрена для публикации 24 августа 2021 г.

О Б АВТОРАХ: **Нина Васильевна Данилина** — доктор технических наук, заведующая кафедрой градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 686739, Scopus: 57192377385, ORCID: 0000-0002-9465-6435, ResearcherID: F-2882-2017; DanilinaNV@mail.ru;

Алиреза Маджорзадехвахири — аспирант кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1103511, Scopus: 57209311034, ORCID: 0000-0002-9800-8830; alireza_majorzadehzahiri@yahoo.com.

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

УДК 624.078:004.9

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.986-996

Исследование изменения параметров, влияющих на податливость соединения колонны с фундаментом

Л.И. Астахова, И.В. Астахов, А.А. Юхнина, А.А. Лимонина

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Существующие виды задания соединений в расчетной схеме — шарнирное и абсолютно жесткое — зачастую не отражают реальную работу узла. Отсутствие расчета действительной жесткости соединения и ее неучет при проектировании каркаса могут привести к отличному от расчетного распределению усилий и увеличению перемещений элементов каркаса. Цель настоящей работы — изучение влияния размеров элементов, формирующих базу колонны, на ее вращательную жесткость.

Материалы и методы. Расчет поперечной рамы каркаса производился в программном комплексе Dlubal RFEM. Рассчитанные усилия, действующие в нижнем сечении колонны, были перенесены в расчетные модели базы колонны, выполненные в программном комплексе IDEA StatiCa, в котором и осуществлялся дальнейший расчет жесткостей соединений.

Результаты. Определены вращательные жесткости соединений при различном конструктивном решении базы колонны. Проанализировано изменение жесткости соединения колонны с фундаментом при увеличении толщины и высоты опорных ребер. На основании проведенных расчетов построены графики выявленных зависимостей. В качестве примера усиления базы колонны предложено введение траверс. Рассмотрено шесть вариантов устройства траверс, а также варианты с тремя опорными ребрами и с траверсами, но без опорных ребер. Рассчитанные жесткости баз колонн сведены в графики, из которых видно, что вложение металла эффективно лишь до определенного момента. Исследованы варианты устройства баз колонн с дополнительными поперечными ребрами.

Выводы. Наибольший вклад в увеличение вращательной жесткости соединения вносит добавление траверсы. Увеличивая толщину или высоту введенных траверс, невозможно добиться абсолютно жесткого закрепления, необходимо комплексное изменение нескольких параметров. Введение дополнительных ребер, расположенных вне плоскости действия момента, практически не отражается на жесткости соединения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: база колонны, полужесткий узел, жесткость соединения, траверса, внецентренное сжатие, металлоемкость, податливость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Астахова Л.И., Астахов И.В., Юхнина А.А., Лимонина А.А. Исследование изменения параметров, влияющих на податливость соединения колонны с фундаментом // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 8. С. 986–996. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.986-996

Research of changes in the parameters that affect the rigidity of the column-foundation joints

Lyubov I. Astakhova, Ivan V. Astakhov, Anastasiya A. Yukhnina, Anna A. Limonina

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

ABSTRACT

Introduction. The existing types of connection assignment in the design scheme — hinged and absolutely rigid joints — do not reflect the actual operation of the connection. The lack of calculation of the actual rigidity of joint and its failure to take into account in the design of the frame can lead to a different distribution of efforts from the calculated one and an increase in the movement of the frame elements. The purpose of this work is to researching the influence of the change size of the elements forming the column base on its rotational rigidity.

Materials and methods. The calculation of the transverse frame was performed in the Dlubal RFEM software package. The calculated efforts acting in the lower section of the column were transferred to the calculated models of the column base, made in the IDEA StatiCa software package, in which the further calculation of the joint rigidity was performed.

Results. The rotational rigidity of the joints with different structural solutions of the column base is determined. The change in the rigidity of the connection between the column and the foundation with an increase in the thickness and height

of the support ribs is analyzed. Based on the calculations, graphs of the identified dependencies are constructed. As an example of strengthening the base of the column, the introduction of a traverse was proposed. The article considers six variants of the traverse device, and variants with three support ribs and with traverses, but without support ribs. The calculated rigidity of the column bases is summarized in graphs, where it can be seen that the metal adding is effective only up to a certain point. Variants of the arrangement of column bases with additional transverse ribs are considered.

Conclusions. The greatest contribution to the increase in the rotational rigidity of the joint is made by the addition of a traverse. By increasing the thickness or height of the introduced traverse, it is impossible to achieve absolutely rigid fixing, it is necessary to change several parameters in a complex way. The introduction of additional ribs located outside the plane of action of the moment practically does not affect the rigidity of the joint.

KEYWORDS: column base, semi-rigid connection, rigidity, connected traverse, eccentric compression, metal consumption, deformation capacity

FOR CITATION: Astakhova L.I., Astakhov I.V., Yukhnina A.A., Limonina A.A. Research of changes in the parameters that affect the rigidity of the column-foundation joints. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(8):986-996. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.986-996 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Современные здания и сооружения чаще всего бывают сложными конструктивными многоэлементными комплексами, создаваемыми для выполнения большого количества различных функций. Для принятия наиболее рационального и точного проектного решения необходимо выполнить расчет, результаты которого более надежно описывали бы действительную работу здания [1–6]. Расчет металлических конструкций можно сделать точнее при учете в расчетной схеме реальной жесткости узлов [6–10].

Традиционно для задания типа соединения элементов используется два варианта закрепления — абсолютно жесткое и шарнирное. Однако на практике может оказаться, что шарнирный узел воспринимает часть изгибающего момента, а жесткое соединение допускает малый поворот сечения [11–14]. В таких случаях происходит перераспределение усилий, что приводит к изменению расчетных длин и перемещений элементов каркаса.

Для понимания на этапе расчета, какой будет реальная работа каркаса здания, в европейской нормативной базе ввели следующую классификацию соединений: условно шарнирные, полужесткие, жесткие. Данное разделение позволяет более точно подобрать сечения элементов каркаса, оценить работу конструкции при определенном проектном строении узлов.

При неучете действительной жесткости соединений возможно нарушение технологического процесса из-за чрезмерно больших перемещений элементов каркаса, особенно в зданиях, оборудованных подвесными кранами, где колонны внецентренно сжаты. Отличительной чертой таких случаев является то, что все конструкции имеют запас по прочности при высокой деформативности схемы. С целью уменьшения перемещений и возобновления технологического процесса следует выполнить усиление узлов, увеличив их жесткость. Вместе с тем любое усиление влечет за собой увеличение металлоемкости каркаса, поэтому важно знать, какой прирост жесткости произойдет при изменении отдельных параметров элементов базы колонны, где появится

наибольшее увеличение жесткости при минимальном вложении дополнительного металла [15–20].

Цель настоящей работы — изучение влияния размеров элементов, формирующих базу колонны, на ее вращательную жесткость.

Численное моделирование осуществлялось в программном комплексе IDEA StatiCa.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве расчетного примера была принята поперечная рама каркаса промышленного здания, состоящая из двух пролетов 24,0 и 12,35 м. Оба пролета оборудованы подвесными кранами грузоподъемностью 6,3 т. Сечения колонн по осям А и Б приняты из двутавров 40Ш1, по оси В — из двутавра 30Ш1. Общий вид расчетной схемы рамы представлен на рис. 1. Расчет рамы производился в программном комплексе Dlubal RFEM.

Проектная конструкция базы колонны показана на рис. 2. Ее основными компонентами являются: ребра жесткости толщиной 10 мм; опорная плита толщиной 38 мм; анкерные болты — химические анкеры HILTI HIT-RE500 с глубиной заделки 400 мм, расставленные из плоскости действия момента. По данным проектной документации, принятая конструкция базы колонны обеспечивает жесткое закрепление нижнего конца колонны в плоскости действия момента, шарнирное закрепление — из плоскости действия момента [5]. Расчет реальной жесткости базы колонны выполнялся в программном комплексе IDEA StatiCa.

Для корректной работы программы расчет производился при установленных европейских нормах проектирования, также была учтена связевая структура каркаса.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты расчетов жесткости базы колонны при последовательном увеличении толщины опорных ребер представлены в виде графика на рис. 3. За 100 % принято значение жесткости абсолютно жесткого закрепления соединения данной конфигурации.

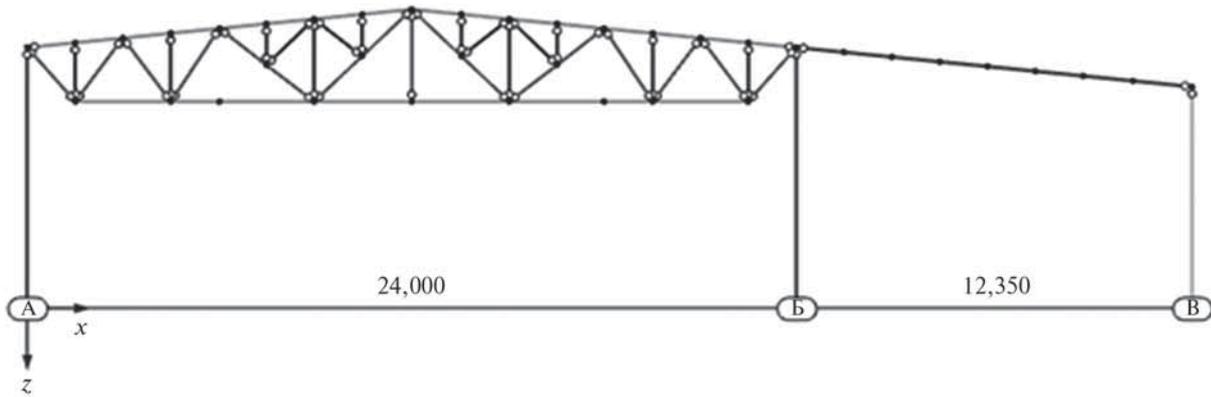


Рис. 1. Общий вид расчетной схемы каркаса

Fig. 1. The overall of framework computational model

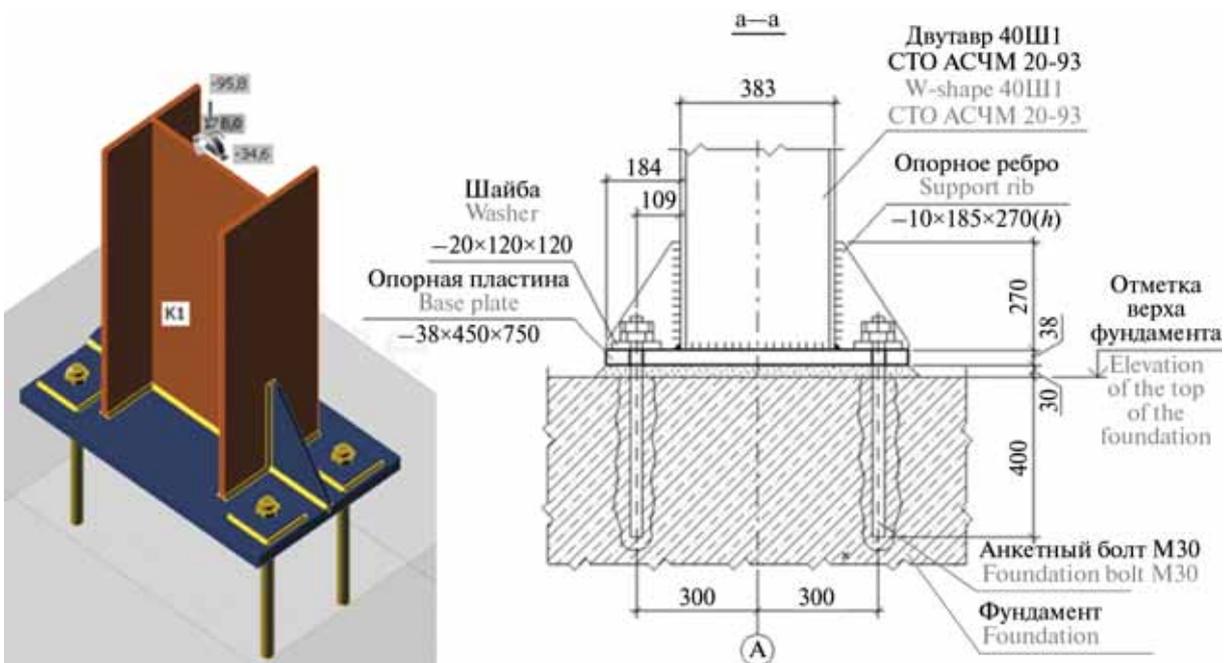


Рис. 2. Проектная конструкция базы колонны

Fig. 2. The structure of column base, which was used in project

Как видно из графика, увеличение толщины опорных ребер неэффективно при толщине более 15 мм. Увеличение толщины ребра с 15 до 30 мм, т.е. на 100 %, приводит к увеличению жесткости соединения на 3,01 %.

Следовательно, толщина ребер 10 мм, принятая в проекте, является достаточной для рассматриваемого примера.

При проектировании рекомендуется принимать высоту опорных ребер, равную $0,5-0,8b_h$, где b_h — высота сечения колонны [16]. Зависимость жесткости от высоты опорных ребер показана на рис. 4.

Согласно результатам, представленным на рис. 4, при увеличении высоты опорных ребер жесткость сначала растет, а затем начинает уменьшаться, однако, все эти изменения происходят в пределах 2 %

от начальной жесткости соединения. Таким образом, рекомендация по проектированию высоты ребра, равной $0,5b_h$, справедлива.

Все приведенные расчеты показывают, что увеличение жесткости базы колонны путем утолщения опорных ребер и увеличения их высоты малоэффективно. Для увеличения жесткости соединения и уменьшения деформативности рамы каркаса можно усилить конструкцию базы колонны путем введения траверс. Варианты устройства базы колонны с траверсами показаны на рис. 5.

Также для сравнения были рассмотрены базы колонн с траверсами, но без ребер и с тремя ребрами с каждой стороны (рис. 6).

Зависимости значений жесткости соединения от высоты и вида траверсы приведены на рис. 7.

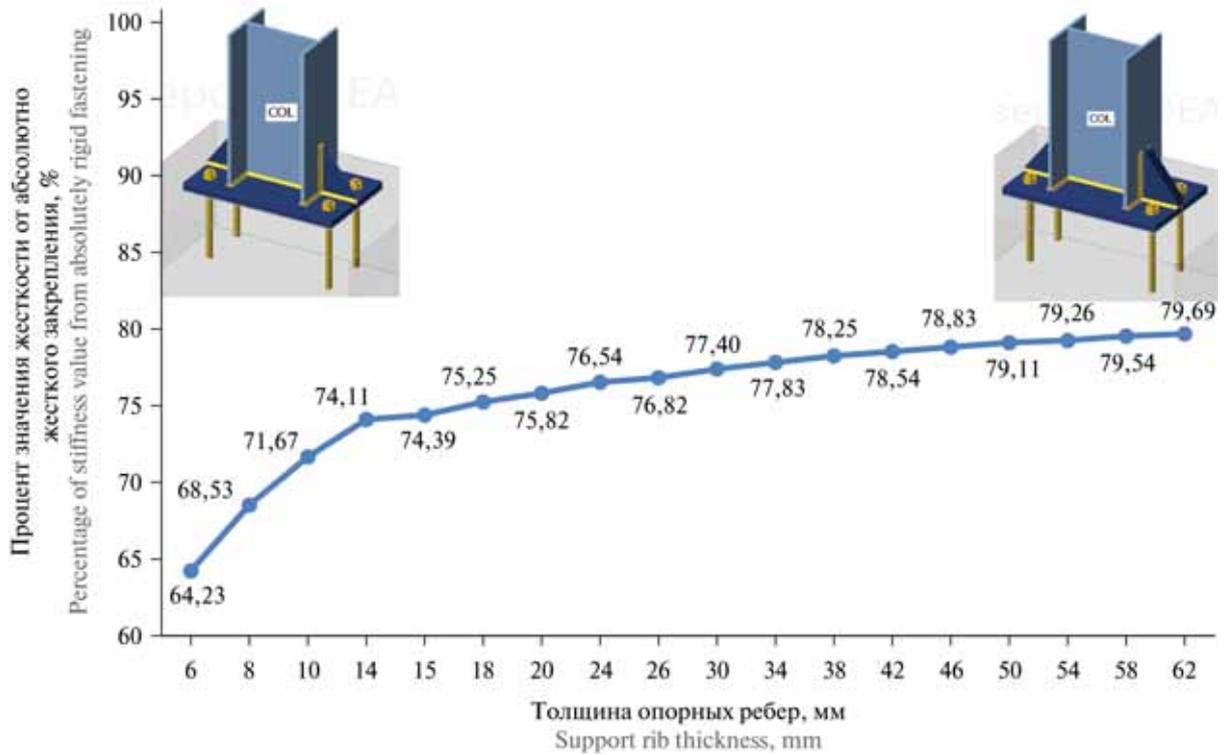


Рис. 3. График зависимости жесткости соединения от толщины опорных ребер

Fig. 3. Graph of the dependence of the joint rigidity on the thickness of the support ribs

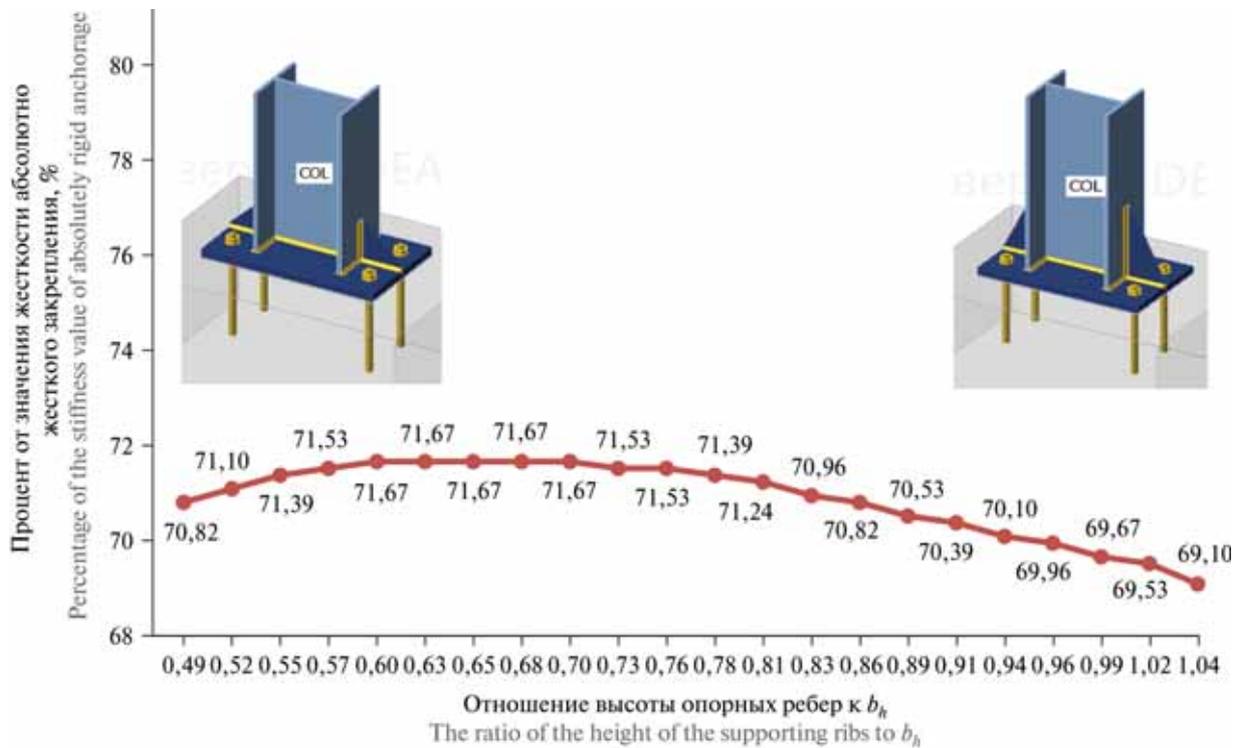


Рис. 4. График зависимости жесткости соединения от высоты опорных ребер

Fig. 4. Graph of the dependence of the joint rigidity on the height of the support ribs

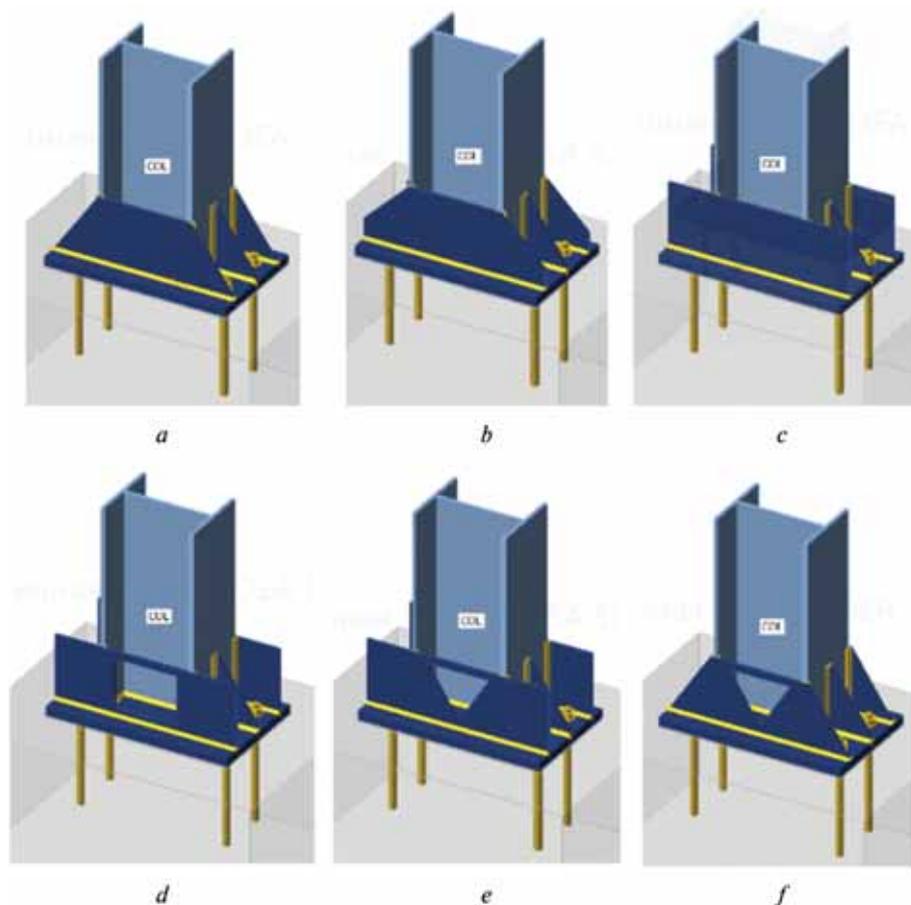


Рис. 5. Варианты устройства базы колонны с трассерами: *a* — со скосом граней до опорной плиты; *b* — со скосом граней под 45°; *c* — прямоугольная; *d* — прямоугольная с прямоугольным вырезом; *e* — прямоугольная с треугольным вырезом, направленным вниз; *f* — со скосом граней до опорной плиты, с треугольным вырезом, направленным вниз

Fig. 5. Options for the device of the column base with connected traverses: *a* — with a bevel of the faces to the base plate; *b* — with a bevel of the faces at 45°; *c* — rectangular; *d* — rectangular with a rectangular cutout; *e* — rectangular with a triangular cutout directed downwards; *f* — with a bevel of the faces to the base plate, with a triangular cutout directed downwards

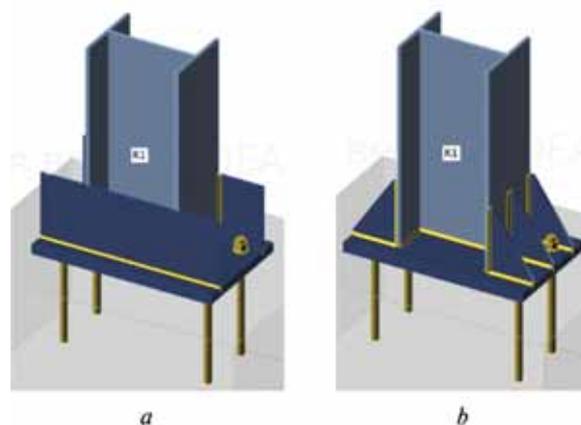


Рис. 6. Базы колонн: *a* — без опорных ребер с прямоугольной трассерой; *b* — с тремя опорными ребрами

Fig. 6. Column bases: *a* — without support ribs, with a rectangular traverse; *b* — with three support ribs

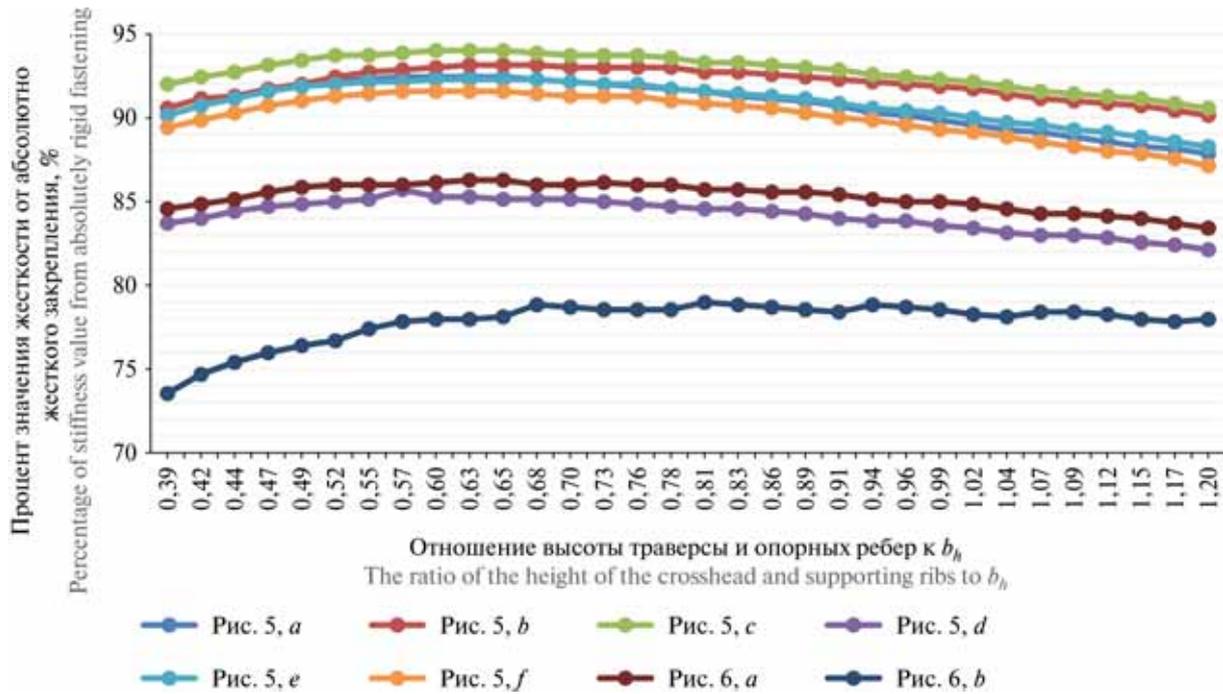


Рис. 7. Зависимость жесткости соединения от высоты и вида траверсы

Fig. 7. Dependence of the joint rigidity on the height and type of the traverse

Анализируя данные результатов расчетов, изображенные на рис. 7, можно сделать следующие выводы:

- базы с траверсами обладают большей жесткостью, чем базы с консольными ребрами (рис. 6, б);
- самой невыгодной является прямоугольная траверса с прямоугольным отверстием (рис. 5, d), ее введение незначительно увеличивает жесткость соединения, по сравнению с остальными вариантами устройства траверс. Наибольший прирост жесткости обеспечивает прямоугольная траверса без вырезов;
- с увеличением высоты траверсы до величины $0,7b_h$ жесткость соединения возрастает. Дальнейшее увеличение высоты траверсы неэффективно, так как при большей металлоемкости соединения жесткость изменяется незначительно.

На жесткость базы колонны может повлиять толщина траверс, данная зависимость показана на рис. 8.

С целью оценки эффективности вложения металла в соединение построим график отношения прироста жесткости к приросту металлоемкости относительно базы колонны, принятой в проекте (рис. 9). Чем больше значение данного коэффициента, тем лучше — меньший прирост металла привел к большему приросту вращательной жесткости.

На графиках, изображенных на рис. 8 и 9, можно заметить следующие зависимости:

- с увеличением толщины траверс жесткость соединения возрастает вне зависимости от вида траверсы;

- при толщине траверсы 10 мм наибольшую жесткость обеспечивает прямоугольная траверса (рис. 5, c);
- коэффициент прироста жесткости к приросту металлоемкости понижается, что означает, что металл вкладывается не столь эффективно;
- наиболее выгодное вложение металла обеспечивает траверса с треугольным отверстием и срезом боковых граней до опорной плиты (рис. 5, f).

В работе [6] указано, что для того, чтобы увеличить равномерную передачу давления с плиты на фундамент, жесткость плиты увеличивают дополнительными ребрами между ветвями траверсы. Рассмотрим четыре варианта конструирования базы колонны: проектный; с наиболее эффективной траверсой (по результатам вычислений, которые приведены выше); с ребрами, установленными между траверсами; с ребрами, установленными снаружи траверс (рис. 10).

Как видно из графика, изображенного на рис. 10, добавление траверсы дает значительно больший эффект, чем добавление ребер из плоскости действия момента. При их введении вращательная жесткость соединения возрастает незначительно в отличие от расхода металла и трудоемкости изготовления такой базы колонны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Описаны изменения лишь некоторых параметров, составляющих базы колонны. Из рассмотрен-

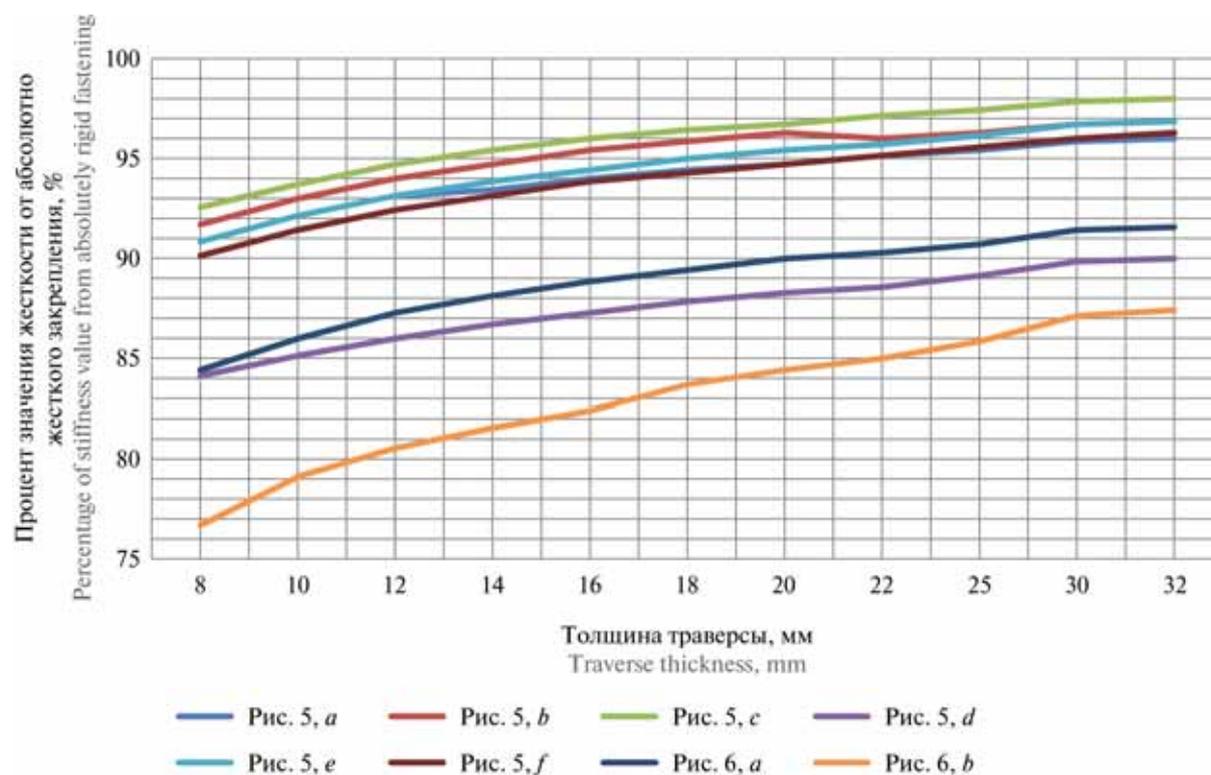


Рис. 8. График зависимости жесткости соединения от толщины и вида траверсы

Fig. 8. Graph of the dependence of the joint rigidity on the thickness and type of the traverse

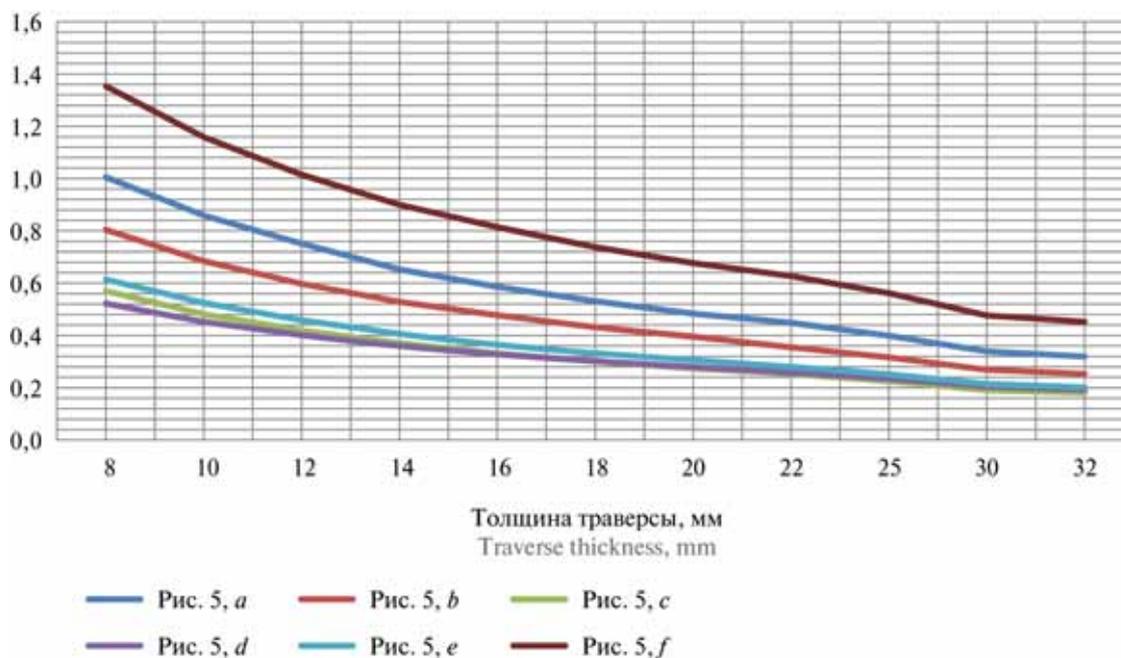


Рис. 9. График зависимости жесткости соединения от толщины и вида траверсы в относительных величинах

Fig. 9. Graph of the dependence of the joint rigidity on the thickness and type of the traverse in relative values

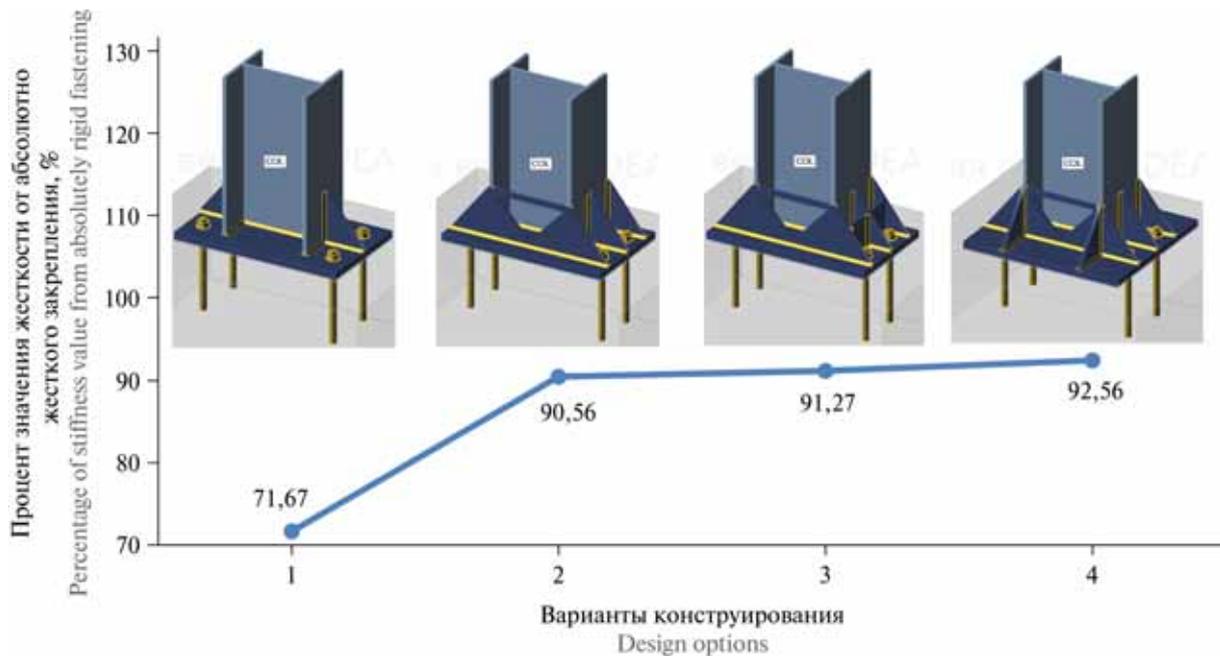


Рис. 10. График зависимости жесткости соединения от введения дополнительных ребер из плоскости действия момента

Fig. 10. Graph of the dependence of the joint rigidity on the including of additional edges from the plane of action of the moment

ных вариантов наибольший вклад в увеличение значения вращательной жесткости соединения внесло введение траверс. Добавление траверс приводит к росту жесткости с 71,7 до 84–98 % от значения жесткости абсолютно жесткого соединения. Данный эффект наблюдается в том числе за счет уменьшения расчетных участков опорной плиты, что позволяет уменьшить ее толщину.

Самый экономически выгодный вариант устройства базы колонны с траверсами — вариант, изображенный на рис. 5, *f*. В абсолютных значениях установка таких траверс дает не максимальный прирост жесткости из возможных, однако, при вложении металла 11,82 кг возможно получить повышение жесткости на 20 %, что является наиболее высоким показателем из предложенных вариантов. К примеру, для конструкции базы колонны, показанной на рис. 5, *b*, необходимо вложить 17,3 кг металла для аналогичного повышения вращательной жесткости соединения.

Увеличивая толщину введенных траверс, также возможно добиться повышения жесткости соединения, вместе с тем, при вложении все большей массы металла в толщину траверс темпы прироста жесткости уменьшаются. Для рассматриваемого примера оптимальная толщина траверс — 10–14 мм.

Соотношение жесткостей вариантов баз колонн с траверсами сохраняется и при увеличении высоты траверс, и при росте их толщин.

Введение дополнительных ребер из плоскости действия момента практически не отражается на вращательной жесткости соединения. При этом значительно возрастают трудоемкость изготовления соединения и расход металла.

В современном проектировании не следует пытаться достичь абсолютно жесткого закрепления, вместо этого необходимо замоделировать на этапе расчета соединения так, чтобы их податливость обеспечивала допустимые перемещения элементов каркаса при максимально эффективном вложении металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gomes V., Silva A.T., de Lima L.R., da Silva Vellasco P.C. Numerical investigation of semi-rigid connection ultimate capacity // REM — International Engineering Journal. 2018. Vol. 71. Issue 4. Pp. 505–512. DOI: 10.1590/0370-44672018710031
2. Kartal M.E., Basaga H.B., Bayraktar A. Effects of semi-rigid connection on structural responses // Electronic Journal of Structural Engineering. 2010. Vol. 10. Pp. 22–35.
3. Abdullah A.A., Mutalib A.A., Baharom S. Nonlinear inelastic model of steel column with semi-rigid frame connections // Journal of Engineering Science and Technology. 2020. Vol. 15. Pp. 58–65.

4. Zivkovic S., Stojkovic N., Spasojevic-Surdilovic M. Global analysis of steel constructions with semi-rigid connections // *Tehnicki vjesnik — Technical Gazette*. 2020. Vol. 27. Issue 3. Pp. 951–960. DOI: 10.17559/TV-20180414100627
5. Llanes-Tizoc M.D., Reyes-Salazar A., Ruiz S.E., Valenzuela-Beltrán F., Bojorquez E., Chávez R. Reliability analysis of steel buildings considering the flexibility of the connections of the GFs // *Structures*. 2020. Vol. 27. Pp. 2170–2181. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.08.014
6. Atak A. Experimental determination and numerical modeling of the stiffness of a fastener // *Materials Testing*. 2020. Vol. 62. Issue 12. Pp. 1215–1220. DOI: 10.3139/120.111607
7. Faridmehr I., Tahir M.M., Osman M.H. An overview of the connection classification index // *Advanced Steel Construction*. 2019. Vol. 15. Issue 2. Pp. 145–156. DOI: 10.18057/IJASC.2019.15.2.4
8. Shalhan O., Maaly H.M., Sagioglu M., Hamdy O. Design optimization of semi-rigid space steel frames with semi-rigid bases using biogeography-based optimization and genetic algorithms // *Structural Engineering and Mechanics*. 2019. Vol. 70. Issue. 2. Pp. 221–231. DOI: 10.12989/sem.2019.70.2.221
9. Teruna D.R. Evaluation of behavior and performance of the braced/unbraced four story of steel frame with semi rigid connection // *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 270. P. 01002. DOI: 10.1051/mateconf/201927001002
10. De Alvarenga A.R. Plastic-zone advanced analysis — Formulation including semi-rigid connection // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 212. P. 110435. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110435
11. Hassan E.M., Admuthe S., Mahmoud H. Response of semi-rigid steel frames to sequential earthquakes // *Journal of Constructional Steel Research*. 2020. Vol. 173. P. 106272. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106272.
12. Zohra D.F., Abd Nacer I.T. Dynamic analysis of steel frames with semi-rigid connections // *Structural Engineering and Mechanics*. 2018. Vol. 65. Issue 3. Pp. 327–334. DOI: 10.12989/sem.2018.65.3.327
13. Faridmehr I., Tahir M.M., Osman M.H., Azimi M. Cyclic behaviour of fully-rigid and semi-rigid steel beam-to-column connections // *International Journal of Steel Structures*. 2020. Vol. 20. Issue 2. Pp. 365–385. DOI: 10.1007/s13296-019-00290-8
14. Melchers R.E. Column-base response under applied moment // *Journal of Constructional Steel Research*. 1992. Vol. 23. Issue 1–3. Pp. 127–143. DOI: 10.1016/0143-974X(92)90040-L
15. Seco L.D., Couchaux M., Hjiqaj M., Neves L.C. Column base-plates under biaxial bending moment // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 231. P. 111386. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111386
16. Stamatopoulos G.N., Ermopoulos J.C. Experimental and analytical investigation of steel column bases // *Journal of Constructional Steel Research*. 2011. Vol. 67. Issue 9. Pp. 1341–1357. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.03.007
17. Cui Y., Wang F.Z., Yamada S. Effect of column base behavior on seismic performance of multi-story steel moment resisting frames // *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2019. Vol. 19. Issue 01. P. 1940007. DOI: 10.1142/S0219455419400078
18. You Y.C., Lee D. Development of improved exposed column-base plate strong-axis joints of low-rise steel buildings // *Journal of Constructional Steel Research*. 2020. Vol. 169. P. 106062. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106062
19. Falborski T., Hassan A.S., Kanvinde A.M. Column base fixity in steel moment frames: Observations from instrumented buildings // *Journal of Constructional Steel Research*. 2020. Vol. 168. P. 105993. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.105993
20. Туснина В.М. Податливые соединения стальных балок с колоннами // *Инженерно-строительный журнал*. 2017. № 5. С. 25–39. DOI: 10.18720/MCE.73.3

Поступила в редакцию 14 мая 2021 г.

Принята в доработанном виде 25 июня 2021 г.

Одобрена для публикации 29 июля 2021 г.

О Б АВТОРАХ: **Любовь Ивановна Астахова** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 708581; amalgamaali@mail.ru;

Иван Витальевич Астахов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; 3557710@mail.ru;

Анастасия Андреевна Юхнина — магистрант кафедры металлических и деревянных конструкций; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 1109898; a.yukhnina@yandex.ru;

Анна Александровна Лимонина — магистрант кафедры металлических и деревянных конструкций; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; limonina555@mail.ru.

REFERENCES

1. Gomes V., Silva A.T., de Lima L.R., da Silva Vellasco P.C. Numerical investigation of semi-rigid connection ultimate capacity. *REM—International Engineering Journal*. 2018; 71(4):505-512. DOI: 10.1590/0370-44672018710031
2. Kartal M.E., Basaga H.B., Bayraktar A. Effects of semi-rigid connection on structural responses. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2010; 10: 22-35.
3. Abdullah A.A., Mutalib A.A., Baharom S. Non-linear inelastic model of steel column with semi-rigid frame connections. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2020; 15:58-65.
4. Zivkovic S., Stojkovic N., Spasojevic-Surdilovic M. Global analysis of steel constructions with semi-rigid connections. *Tehnicki vjesnik — Technical Gazette*. 2020; 27(3):951-960. DOI: 10.17559/TV-20180414100627
5. Llanes-Tizoc M.D., Reyes-Salazar A., Ruiz S.E., Valenzuela-Beltrán F., Bojorquez E., Chávez R. Reliability analysis of steel buildings considering the flexibility of the connections of the GFs. *Structures*. 2020; 27:2170-2181. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.08.014
6. Atak A. Experimental determination and numerical modeling of the stiffness of a fastener. *Materials Testing*. 2020; 62(12):1215-1220. DOI: 10.3139/120.111607
7. Faridmehr I., Tahir M.M., Osman M.H. An overview of the connection classification index. *Advanced Steel Construction*. 2019; 15(2):145-156. DOI: 10.18057/IJASC.2019.15.2.4
8. Shallan O., Maaly H.M., Sagiroglu M., Hamdy O. Design optimization of semi-rigid space steel frames with semi-rigid bases using biogeography-based optimization and genetic algorithms. *Structural Engineering and Mechanics*. 2019; 70(2):221-231. DOI: 10.12989/sem.2019.70.2.221
9. Teruna D.R. Evaluation of behavior and performance of the braced/unbraced four story of steel frame with semi rigid connection. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 270:01002. DOI: 10.1051/mateconf/201927001002
10. De Alvarenga A.R. Plastic-zone advanced analysis – Formulation including semi-rigid connection. *Engineering Structures*. 2020; 212:110435. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110435
11. Hassan E.M., Admuthe S., Mahmoud H. Response of semi-rigid steel frames to sequential earthquakes. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020; 173:106272. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106272
12. Zohra D.F., Abd Nacer I.T. Dynamic analysis of steel frames with semi-rigid connections. *Structural Engineering and Mechanics*. 2018; 65(3):327-334. DOI: 10.12989/sem.2018.65.3.327
13. Faridmehr I., Tahir M.M., Osman M.H., Azimi M. Cyclic behaviour of fully-rigid and semi-rigid steel beam-to-column connections. *International Journal of Steel Structures*. 2020; 20(2):365-385. DOI: 10.1007/s13296-019-00290-8
14. Melchers R.E. Column-base response under applied moment. *Journal of Constructional Steel Research*. 1992; 23(1-3):127-143. DOI: 10.1016/0143-974X(92)90040-L
15. Seco L.D., Couchaux M., Hjiat M., Neves L.C. Column base-plates under biaxial bending moment. *Engineering Structures*. 2021; 231:111386. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111386
16. Stamatopoulos G.N., Ermopoulos J.C. Experimental and analytical investigation of steel column bases. *Journal of Constructional Steel Research*. 2011; 67(9):1341-1357. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.03.007
17. Cui Y., Wang F.Z., Yamada S. Effect of column base behavior on seismic performance of multi-story steel moment resisting frames. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2019; 19(01):1940007. DOI: 10.1142/S0219455419400078
18. You Y.C., Lee D. Development of improved exposed column-base plate strong-axis joints of low-rise steel buildings. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020; 169:106062. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106062
19. Falborski T., Hassan A.S., Kanvinde A.M. Column base fixity in steel moment frames: Observations from instrumented buildings. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020; 168:105993. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.105993
20. Tushina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 5(73):25-39. DOI: 10.18720/MCE.73.3

Received May 14, 2021.

Adopted in revised form on June 25, 2021.

Approved for publication on July 29, 2021.

BIONOTES: **Lyubov I. Astakhova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Steel and Wooden Structures; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; amalgamaali@mail.ru;

Ivan V. Astakhov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, of the Department of Steel and Wooden Structures; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; 3557710@mail.ru;

Anastasiya A. Yukhnina — master's degree of the Department of Steel and Wooden Structures; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RISC: 1109898; a.yukhnina@yandex.ru;

Anna A. Limonina — master's degree of the Department of Steel and Wooden Structures; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RISC: 708581; limonina555@mail.ru.

Определение усилия в гибком упоре комбинированной плиты с использованием профилированного настила

Л.Р. Гимранов, А.И. Фаттахова

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В зданиях со стальным каркасом наиболее часто применяются комбинированные сталежелезобетонные перекрытия с использованием профилированного настила. Совместная работа диска перекрытия и балок настила обеспечивается постановкой гибких упоров. В рамках исследования по определению перемещений в плите перекрытия была поставлена задача выявления сдвигающего усилия в гибких упорах от действия горизонтальной нагрузки. В результате предложен способ определения усилия в стад-болтах при их постановке по контуру плиты, основанный на аналогии с расчетом группы болтов.

Материалы и методы. На базе расчета группы болтов выведены расчетные выражения для установления усилия в гибких упорах. С целью определения достоверности получаемых значений выполнен расчет методом конечных элементов, реализованный на программном комплексе Лира-САПР. Рассматривались образцы плит с разным соотношением сторон. Рассчитывалась сходимости решения различными методами для плиты размерами 0,6 × 0,6 м с малым количеством гибких упоров, после чего изучалась сходимости предложенного решения при реальных размерах плит с большим количеством гибких упоров.

Результаты. Получена формула для определения усилия в каждом гибком упоре, в частности в наиболее нагруженных крайних упорах. Для наглядности и возможности применения предложенного способа выполнен расчет на ЭВМ. Показаны ограничения по применимости данного способа. Даны пояснения к выявлению геометрических характеристик гибких упоров.

Выводы. Расчет по аналогии с группой болтов позволяет определить усилие в гибком упоре любого конструктивного сечения. Предложенный способ подходит для оценки несущей способности гибких упоров, так как прост в применении. Значение усилия даст возможность установить деформативность как самого гибкого упора, так и перемещения плиты в целом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сталежелезобетонная плита, профилированный настил, горизонтальные нагрузки, усилия в гибких упорах, гибкие упоры, стад-болты

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гимранов Л.Р., Фаттахова А.И. Определение усилия в гибком упоре комбинированной плиты с использованием профилированного настила // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 8. С. 997–1005. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.997-1005

Flexible stop's force determining method in a combined plate using profiled flooring

Linur R. Gimranov, Alsou E. Fattakhova

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Steel-reinforced concrete floors with profiled decking are most often used in steel frame buildings. The joint work of the floor slab and tertiary beam is ensured by shear studs. The article discusses a shear studs stress determining method from horizontal load. Studs are placed along the slab's perimeter. The method based on the bolts' group calculation analogy.

Materials and methods. Based on the bolts group calculation design expressions were derived to determine the force in shear studs. To determine the obtained values reliability a finite element calculation was performed using the Lira-CAD software package. Different aspect ratios slabs samples were considered. The solution's convergence was determined by various methods for a plate with 0.6 × 0.6 m dimensions with a small number of studs, after which the proposed solution convergence was studied for real dimensions of plates with a large number of flexible stops.

Results. The resulting formula allows determining the stress in each flexible stop, in particular in the most loaded corner studs. The computer calculation was performed for the proposed method clarity and using possibility. The method's use restriction was determined. In addition, the shear studs' geometric characteristic's definition explanations are given.

Conclusions. The proposed calculation method allows to determinate any structural section's shear stud's stress. Therefore, it allows to choose stud's optimal cross-section area or check its bearing capacity in the existing buildings and structures floors. Moreover, the stress value allows to determine the stud's and a whole slab's deformations.

KEYWORDS: shear studs, shear stiffness, horizontal loads, shear forces, wind load, temperature effect, stud's bearing capacity

FOR CITATION: Gimranov L.R., Fattakhova A.E. Flexible stop's force determining method in a combined plate using profiled flooring. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(8):997-1005. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.997-1005 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Основная нагрузка для зданий небольшой этажности — вертикальная, с увеличением этажности значение горизонтальных нагрузок увеличивается. Причиной тому могут быть ветровые, сейсмические нагрузки, в зависимости от назначения здания могут быть нагрузки от оборудования или машин. Горизонтальные нагрузки воспринимаются дисками перекрытия, а именно гибкими упорами, объединяющими работу железобетонной плиты, профилированного настила и балок.

В зарубежной литературе имеется раздел расчетов комбинированных перекрытий с учетом действия горизонтальных нагрузок [1, 2]. Однако основной акцент сделан на определение несущей способности, а способ установления усилия не приводится. В отечественной литературе подобного раздела расчетов нет. Рекомендации по подбору сечений, шага постановки гибких упоров основываются на обеспечении совместной работы железобетона и несъемной опалубки из профилированного листа [3–5]. Кроме того, определение усилий в упорах остается задачей инженера.

Изучение отечественной нормативной литературы позволило сделать вывод, что перемещения каркасов зданий, в частности комбинированных дисков перекрытий с использованием профилированного настила, от действия горизонтальной нагрузки не регламентируются. В зарубежных источниках данная тема затрагивается [6, 7], однако также мало изучена. В результате чего была поставлена задача — разработать метод расчета комбинированных перекрытий на горизонтальные нагрузки, а также оценки допустимых деформаций от горизонтальных нагрузок. В работах [8, 9] отмечено, что гибкие упоры при вертикальной нагрузке практически не работают. А в публикации [10] указано, что основную роль при определении перемещений выполняют гибкие упоры. При этом возник вопрос выявления усилий в гибких упорах для дальнейшего установления перемещений.

Так как сталежелезобетонные плиты в основном опирают на балки настила по четырем сторонам [11], то рассматривалась задача, в которой гибкие упоры находятся по контуру ячейки балочной клетки. В качестве гибких упоров чаще всего применяют стад-болты — небольшие стержни круглого сечения диаметром от 6 до 25 мм со шляпкой на одном конце. Стад-болты, расположенные по периметру плиты, напоминают группу болтов, отсюда возникла идея возможности определения усилия в гибком упоре как в группе болтов.

В данной статье описывается способ нахождения усилия в стад-болте, способы определения геометрических характеристик их группы. Для выясне-

ния применимости предложенного способа выполнен расчет на ПК Лири-САПР. Проведен сравнительный анализ результатов, полученных ручным и машинным расчетами. Были введены уточнения по возможности применения предложенной формулы. Приведенный способ позволит определять значения усилий в гибких упорах, не прибегая к расчетам на ЭВМ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Инженерная задача состоит в том, чтобы простейшим путем установить те или иные значения без потерь точности. При рассмотрении способов выявления перемещений комбинированной плиты перекрытия потребовалось узнать усилие в гибком упоре.

В процессе изучения руководства по проектированию диафрагм [12], а также статей [13, 14] замечено, что гибкие упоры, обеспечивающие совместность работы ячейки балочной клетки и самой плиты, работают аналогично группе болтов, нагруженных некой нагрузкой, приложенной с эксцентриситетом. Деформация плиты квадратной формы в плане при горизонтальных нагрузках представлена на рис. 1, а. Видно, что рамка (ячейка балочной клетки) будто бы проворачивается вокруг центра тяжести плиты, и в то же время деформируется от сдвигающих усилий: форма стала ромбовидной. Аналогичный характер деформации группы болтов в соединении, работающем на поперечную нагрузку и момент (рис. 1, б), позволил выдвинуть гипотезу, что, используя те же формулы, что и для болтового соединения, возможно определить усилие в гибком упоре.

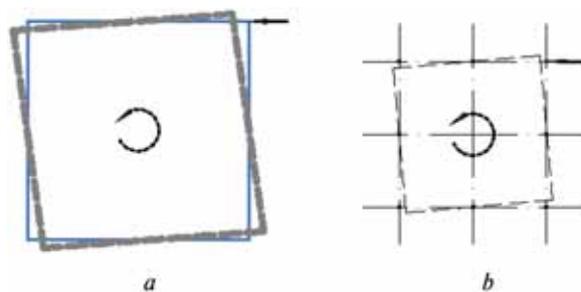


Рис. 1. Сравнение расчетных схем деформаций: *a* — плиты с гибкими упорами; *b* — группы болтов

Fig. 1. Calculated deformation schemes comparison: *a* — plates with flexible stops; *b* — groups of bolts

В труде [15] рассматривается несколько вариантов определения усилия для различных случаев приложения нагрузки. Для решения данной задачи подходили три способа решения: так называемый упругий метод, метод мгновенного центра вращения и итерационный метод установления центра тяжести.

Учитывая достоинства и недостатки перечисленных методов, было принято решение, что упругий метод подходит более остальных. Его суть заключается в суммировании векторов усилий от сдвига и вращения (рис. 2). По сравнению с двумя другими методами, требующими нескольких итераций, выбранный метод позволяет определить значение усилия сразу. Однако метод обладает несущественным недостатком: завышенные значения усилий [16]. Подобным недостатком можно пренебречь, потому что завышенное значение идет в запас прочности рассчитываемых упоров. Кроме того, мы считаем не болтовое соединение, а решение берем в качестве аналога.

Усилие в болте определяется как сумма усилия от перемещения вдоль оси действия силы и от поворота вокруг центра тяжести группы болтов. Стрелками на рис. 2 показаны составляющие от поворота Q_{Mi} и от сдвига Q_{Fi} .

Усилие в i -ом болте есть сумма векторов усилия от сдвига Q_{Fi} и поворота Q_{Mi} (выражение (1)). Сдвигающая сила равномерно распределяется между всеми болтами (2), в то время как усилие от поворота определяется как произведение крутящего момента на площадь сечения всех болтов, деленное на полярный момент инерции и умноженное на расстояние между центрами тяжести болта и плиты. В формуле (3) через x_i и y_i обозначены расстояния по ширине и длине плиты. Сам крутящий момент равен произведению сдвигающей силы на плечо, равное расстоянию от точки приложения силы до центра тяжести плиты. По аналогии с формулой (3) плечо было обозначено через x_F и y_F . Подставляя формулы (2)–(4) в выражение (1), получим формулу (6) для определения усилия в любом болте плиты:

$$Q_i = \sqrt{Q_{Fi}^2 + Q_{Mi}^2}, \quad (1)$$

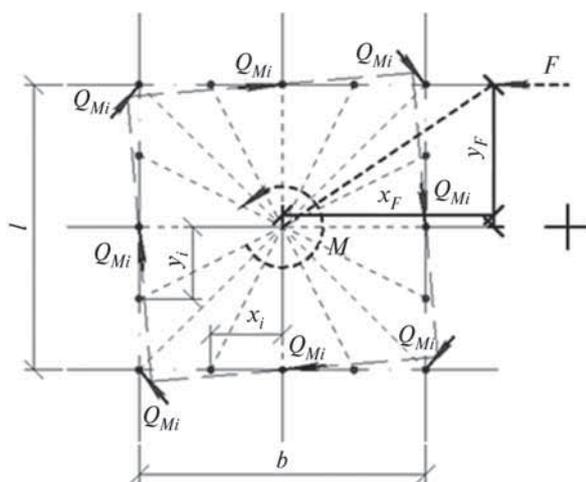


Рис. 2. Усилия в болтах от поворота и сдвига
Fig. 2. Pivot and shear bolt forces

$$Q_{Fi} = \frac{F}{n}, \quad (2)$$

$$Q_{Mi} = \frac{M_z}{J_p} A_b \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{2}, \quad (3)$$

$$M_z = F \frac{\sqrt{x_F^2 + y_F^2}}{2}, \quad (4)$$

$$Q_{Mi} = F \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{2} \cdot \frac{A_b}{J_p} \cdot \frac{\sqrt{x_F^2 + y_F^2}}{2}, \quad (5)$$

$$Q_i = F \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{2} \cdot \frac{A_b}{J_p} \cdot \frac{\sqrt{x_F^2 + y_F^2}}{2}\right)^2}, \quad (6)$$

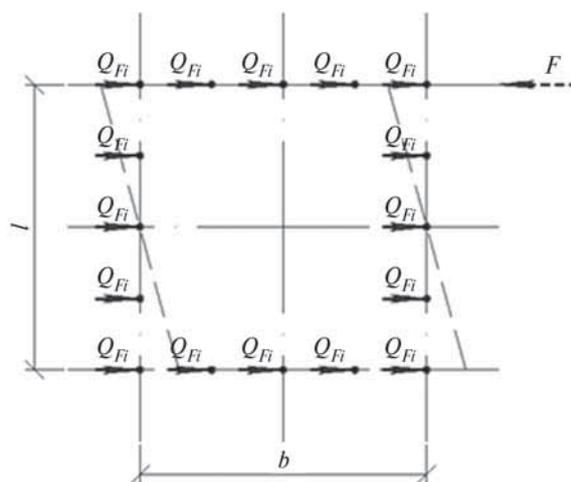
где n — общее количество стад-болтов; A_b — площадь сечения группы болтов; J_p — полярный момент инерции группы болтов относительно центра тяжести.

В проведенных ранее исследованиях [17] установлено, что угловые гибкие упоры более остальных напряжены и подвержены поломке, поэтому в первую очередь рассмотрим угловой гибкий упор, для которого $x_i = x_F = b/2$, $y_i = y_F = l/2$, поэтому формула (6) примет вид (7)

$$Q = F \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right)^2 + \left(\frac{A_b}{J_p} \cdot \frac{(b^2 + l^2)}{4}\right)^2}, \quad (7)$$

где $b \times l$ — размеры плиты в плане.

Отметим, что наличие в формуле геометрических характеристик позволяет учитывать различные конструктивные решения гибких упоров. Если предусмотрено различное решение упоров по длине



и ширине плиты, то можно ввести коэффициент приведения геометрических характеристик гибких упоров к одной модели. В этом случае расчетная модель перекрытия будет упрощена.

Для определения применимости данной формулы выполнен расчет на ПК Лири-САПР. Далее проведен сравнительный анализ полученных усилий, вычисленных разными методами, что дало возможность наглядно продемонстрировать гипотезу, а также установить точность получаемых результатов относительно наиболее распространенного способа расчета.

Рассмотрена плита размерами $0,6 \times 0,6$ м, опертая по четырем сторонам, гибкие упоры — стад-болты поставлены по всему контуру. На рис. 3 представлена модель данной плиты, построенная в ПК Лири-САПР.

Стержни, моделирующие балки настила, были приняты двутаврового сечения № 60Б2, гибкие упоры (стад-болты диаметром 20 мм) заданы стержнями длиной 5 мм, чтобы практически исключить их изгиб. Сама плита смоделирована пластинами толщиной в 13 мм, с жесткостными характеристиками бетона В25. По углам плита шарнирно закреплена. Нагрузка прикладывалась на балки настила так, чтобы рамка сдвигалась и проворачивалась относительно закрепленной плиты. Эта модель уже применялась в предыдущих исследованиях [7, 17] и доработана таким образом, чтобы результат был близок к реальной работе комбинированного перекрытия с использованием профилированного настила.

На образец приложена нагрузка, направленная вдоль оси O_x , $F = 50$ кН. В результатах численного эксперимента нас интересовали значения Q_y и Q_z .

Далее вычислены значения усилий в угловом упоре по формуле (7). Полученные в результате компьютерного моделирования значения сравнивались с вычисленными по формулам. Чтобы определить, насколько точно можно рассчитать усилия в плите

реальных размеров, рассмотрен образец размерами 6×6 м, жесткости и шаг постановки гибких упоров оставались прежними.

После чего были замоделированы еще три плиты с теми же характеристиками, но с соотношением сторон 1:2, 2:3 и 1:3, 3×6 м, 4×6 м и 2×6 м соответственно. Нагрузка приложена как к большей, так и к меньшей сторонам. Определялась возможность применения предложенного способа для прямоугольных в плане плит. Здесь же, с учетом выводов, сделанных после первого анализа результатов, сравнивались лишь значения усилий, полученных в угловых стад-болтах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассчитаем усилие в угловом гибком упоре по выведенной формуле (7). Для начала вычислим геометрические характеристики, которые будут одинаковыми для всех болтов.

Площадь сечения всех стад-болтов A_b устанавливается по формуле:

$$A_b = n \frac{\pi d^2}{4} = 24 \cdot 3,14 \cdot \frac{(20 \text{ мм})^2}{4} = 7536 \text{ мм}^2, \quad (8)$$

где $d = 20$ мм — диаметр стад-болта; $n = 24$ — общее количество стад-болтов.

Полярный момент инерции относительно центра тяжести плиты J_p определялся по формуле (9):

$$J_p = \sum_{i=1}^n (J_{pi} + A_i (y_i^2 + x_i^2)) = n \frac{d^4}{32} + n \frac{\pi d^2}{4} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i^2 + x_i^2), \quad (9)$$

где x_i — расстояние от центра тяжести i -го болта до центра тяжести всей плиты по ширине плиты; y_i — расстояние от центра тяжести i -го болта до центра тяжести всей плиты по длине плиты.

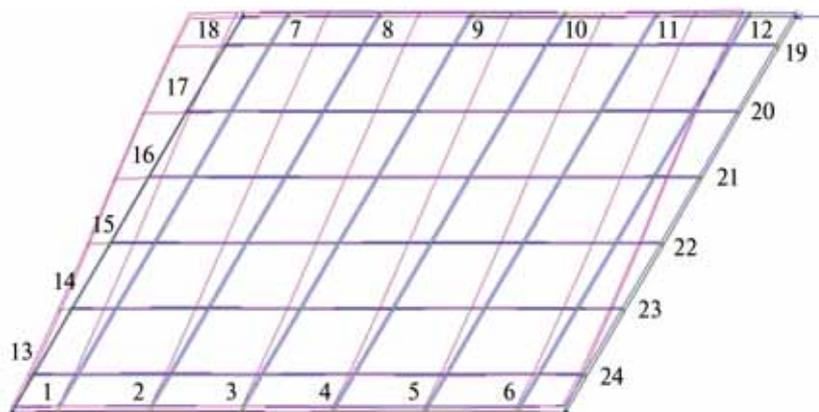


Рис. 3. Общий вид компьютерной модели комбинированной плиты перекрытия с использованием профилированного настила

Fig. 3. Combined floor slab using profiled flooring computer model general view

Для упрощения расчетов сумма квадратов расстояний для приведения центров тяжести каждого стад-болта к центру тяжести всей плиты была решена как произведение квадрата шага постановки стад-болтов на сумму квадратов n первых натуральных чисел. Так как центр тяжести плиты находится по середине, то достаточно определить сумму квадратов расстояний для одной половины. Таким образом, получены формулы (11) и (12). Однако количество болтов в одном направлении было нечетным, а в другом — четным, поэтому для нечетного количества болтов применена сумма квадратов n первых нечетных натуральных чисел (11), а для четного количества — сумма квадратов n первых натуральных чисел (12). Так, подставив выражения (11) и (12) в (10), получим формулу для определения полярного момента инерции группы болтов (13).

$$\sum_{i=1}^n (y_i^2 + x_i^2) = \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2, \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i^2 = 2 \left(\left(\frac{db_i}{2} \right)^2 \frac{n_x \left(4 \left(\frac{n_x}{2} \right)^2 - 1 \right)}{3} \right), \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i^2 = 2 \left(dl_i^2 \frac{\frac{n_y - 1}{2} \left(\frac{n_y - 1}{2} + 1 \right) \left(2 \frac{n_y - 1}{2} + 1 \right)}{6} \right), \quad (12)$$

$$J_p = n \frac{d^4}{32} + n \frac{\pi d^2}{4} \left(\frac{dl_i^2 n_x (n_x^2 - 1)}{12} + \frac{db_i^2 n_y (n_y + 1)(n_y + 2)}{12} \right), \quad (13)$$

где $n_x = 6$ — количество стад-болтов по ширине плиты; $n_y = 6$ — количество стад-болтов по длине плиты; $dl_i = 100$ мм — шаг постановки стад-болтов по дли-

не плиты; $db_i = 100$ мм — шаг постановки стад-болтов по ширине плиты.

$$J_p = 24 \frac{(20 \text{ мм})^4}{32} + 24 \cdot 3,14 \frac{(20 \text{ мм})^2}{4} \times \left(\frac{(100 \text{ мм})^2 \cdot 6(6^2 - 1)}{12} + \frac{(100 \text{ мм})^2 \cdot 6(6-1)(6+2)}{12} \right) = 6,90 \cdot 10^9 \text{ мм}^4. \quad (14)$$

Теперь можно теоретически определить усилие в угловом стад-болте:

$$Q = 50 \text{ кН} \sqrt{\left(\frac{1}{24} \right)^2 + \left(\frac{7536 \text{ мм}^2}{6,90 \cdot 10^9 \text{ мм}^4} \times \frac{((600 \text{ мм})^2 + (600 \text{ мм})^2)}{4} \right)^2} = 8,341 \text{ кН}. \quad (15)$$

Выписаны результаты численного эксперимента образца размерами $0,6 \times 0,6$ м (табл. 1). Рамка состоит из четырех балок, значения усилий в каждой были приблизительно равными, поэтому в таблице представлены значения для одной балки. Значение усилия для сравнения с ручным расчетом рассчитывалось как сумма векторов усилий N и Q_y в балке в месте крепления гибкого упора.

Разница значений для угловых упоров не превышает 1,5 %, что позволяет сделать вывод о возможности применения данного способа. Заметим, что разница значений в болтах, расположенных ближе к центру балки, возрастает.

В качестве эксперимента модель была увеличена до натуральных размеров, т.е. количество стад-болтов в балке возросло до 60. В этом случае значения усилий, вычисленных аналитически и машинным расчетом, совпадали только для 3–5 угловых болтов. Усилия в последующих болтах, расположенных ближе к середине балки, отличались на 20–60 %. Таким образом, можно сделать вывод, что данный способ можно использовать только для определения усилия в угловых гибких упорах.

Табл. 1. Сравнение усилий, полученных в результате численного эксперимента со значениями, полученными аналитически

Table 1. Comparison of the numerical experiment effort with the values obtained

Номер болта Bolt number		1	2	3	4	5	6
Усилие Effort	Ручной Hand	8,341	8,339	8,338	8,338	8,339	8,341
	Машинный Machine	8,268	7,327	6,829	6,825	7,31	8,242
Разница, % Difference, %		0,9	12,1	18,1	18,1	12,3	1,2

Для подтверждения данной гипотезы рассмотрены образцы плит с разным соотношением сторон (рис. 4), замоделированных в натуральную величину. Результаты выявления усилий в угловых болтах, находящихся на углу рамки с приложением нагрузки, приведены в табл. 2.

Аналитический расчет сравнен с результатами, полученными при расчете на программном комплексе. Достоверность результатов, полученных численным экспериментом, описывалась в ранее опубликованных статьях [10, 17].

Отметим, что предложенный способ не позволяет установить горизонтальную и вертикальную проекции усилий в стэд-болтах, которые приводятся в программном комплексе, поэтому в таблице приведены суммарные усилия в болтах.

Обратимся к результатам, полученным при моделировании плиты малых размеров и той же модели,

но в натуральную величину. В модели размером $0,6 \times 0,6$ м определено, что для угловых болтов процент совпадения не превышает 1,5%, при увеличении количества болтов (образец размерами 6×6 м, стэд-болты поставлены с шагом 10 см) выявлено расхождение значений усилий центральных болтов. В работе [16] данный метод также называют консервативным, подразумевая получение несколько завышенного результата. В нашем случае полученные значения меньше полученных в результате численного эксперимента.

Дело в том, что формула не учитывает работу гибкого упора в бетоне. Для угловых упоров касательные напряжения больше, сцепление с бетоном практически не влияет на значение усилий. Касательные напряжения к середине балки уменьшаются, и влияние сцепления бетона становится более значительным [17]. Предложенный метод не учитывает

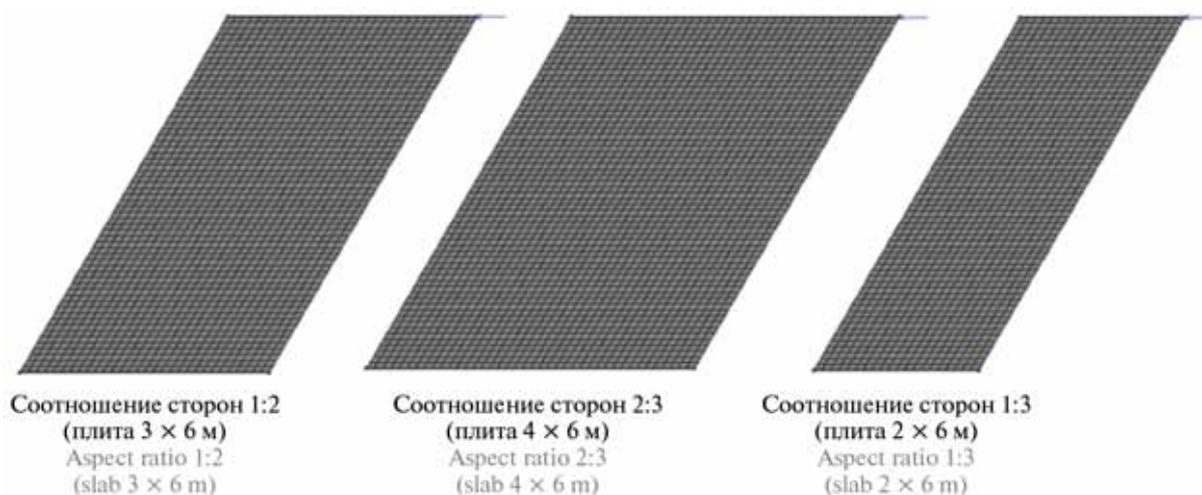


Рис. 4. Общий вид компьютерных моделей комбинированных плит перекрытия с использованием профилированного настила с разным соотношением сторон (показана нагрузка, приложенная лишь по одной стороне)

Fig. 4. Different aspect ratios combined floor slab using profiled flooring computer model general view (the load is shown applied only on one side)

Табл. 2. Сравнение усилий в угловых гибких упорах прямоугольных в плане плит

Table 2. Rectangular slabs' corner flexible stops forces in comparison

№ п/п No.	Координаты стэд-болта относительно центра тяжести плиты, мм Herd bolt coordinates relative to the centre of gravity of the plate, mm		Нагрузка вдоль длинной стороны Load along long side			Нагрузка по короткой стороне Short side load		
	x_i	y_i	Усилия, кН Efforts, kN		Разница, % Difference, %	Усилия, кН Efforts, kN		Разница, % Difference, %
			Теоретический расчет Theoretical procedure	ПК Ли́ра-САПР PC Lira-CAD		Теоретический расчет Theoretical procedure	ПК Ли́ра-САПР PC Lira-CAD	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1500	3000	3,479	3,441	1,1	3,767	3,707	1,6
2	2000	3000	3,918	3,863	1,4	4,027	3,967	1,5
3	1000	3000	3,35	3,31	1,2	4,096	4,022	1,8

данного факта, в результате чего усилия, полученные при расчете предложенным методом, больше тех, которые были получены методом конечных элементов при расчете на ЭВМ. В труде [18] расписывается, какая часть усилия в стад-болтах приходится на работу упора в плите, а какая — от сдвига балки настила. Теоретический расчет меньше экспериментального как раз на 13–22 %, которые приходится на работу анкера в бетоне.

С другой стороны, в публикациях [18–20] было отмечено, что усилия от нормативной нагрузки, необходимые для выявления перемещений, меньше нормативных приблизительно на 20 %, а программный комплекс определяет расчетные значения. Следовательно, предлагаемый способ расчета подходит для определения несущей способности по второй группе предельных состояний.

Рассмотрим результаты численного эксперимента прямоугольных в плане плит (табл. 2). В пятом и восьмом столбцах приведены суммарные значения усилий для угловых стад-болтов, расположенных ближе всего к точке приложения нагрузки. Как и в примере с квадратной в плане плитой разница получаемых значений не более 2 %. Однако при сравнении усилий в болтах, расположенных ближе к середине пролета балки, разница в результатах увеличивается.

При приложении нагрузки вдоль длинной стороны разница в получаемых ручным и машинным расчетом значениях не более 60 %, как и в случае с квадратной в плане плитой. 60 % получены для стад-болтов, расположенных ближе всего к середине пролета. Что же касается болтов по коротким сторонам, то сходимость методов обратно пропорциональна количеству болтов: для среднего болта в четырехметровой балке составила 33 %, для двухметровой — 16 %.

Если нагрузка приложена по короткой стороне, то усилия в гибких упорах, расположенных ближе к середине шестиметровых балок, получаются в несколько раз больше тех, которые получены в программном комплексе. Примечательно, что чем ближе к квадратной форме плита, тем меньше разница.

То есть усилия, полученные предложенным методом, больше в 1,2 раза для плиты 4×6 м, а для плиты 2×6 м — в 3,2 раза.

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенным методом можно определять усилия в угловых гибких упорах закрепленных по контуру плит перекрытия вне зависимости от соотношения сторон и количества креплений. Анализ процента несходимости образцов разных размеров позволил заключить, что при 30 и менее гибких упорах вдоль балки сходимости ручного и машинного расчетов дают возможность пользоваться полученными расчетными формулами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные усилия позволят не только оценить несущую способность наиболее нагруженных гибких упоров без применения ЭВМ, но и в дальнейшем определить деформативность гибкого упора, которая, в свою очередь, влияет на перемещения каркаса относительно плиты.

Резюмируем выводы, сделанные в результате изучения предложенного метода определения усилий в гибких упорах по аналогии с группой болтов:

- определено усилие в гибких упорах комбинированного сталежелезобетонного перекрытия с использованием профилированного настила по аналогии с определением усилия в группе болтов;
- математические преобразования позволили упростить вычисления геометрических характеристик всех гибких упоров;
- формула дает несколько заниженный результат, а также подходит лишь для определения усилия в угловых гибких упорах;
- предложенным способом можно рассчитать усилия в наиболее нагруженном гибком упоре для оценки перемещений, но не несущей способности упора;
- с целью дальнейших исследований данный способ будет применяться для первичной оценки усилий в гибких упорах, пока не будет найден более точный способ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джонсон Р.П. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 4: Проектирование сталежелезобетонных конструкций EN 1994-1-1 / пер. с англ. М.: МГСУ, 2012. 413 с.
2. Алмазов В.О., Арутюнян С.Н. Проектирование сталежелезобетонных плит перекрытий по Еврокоду 4 и российским рекомендациям // Вестник МГСУ. 2016. № 8. С. 51–65. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.8.51-65
3. Замалиев Ф.С. К расчету сталежелезобетонных перекрытий со стальным профилированным

- настилом // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 3 (37). С. 129–134.
4. Айрумян Э.Л., Каменщиков Н.И., Румянцев И.А. Особенности расчета монолитных плит сталежелезобетонных перекрытий по профилированному стальному настилу // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 9. С. 21–26.
5. Замалиев Ф.С. К расчету анкерных связей сталежелезобетонных конструкций // Известия КГАСУ. 2019. № 3 (49). С. 87–94.

6. Farag R. Reliability assessment of wall-frame structures // *Ain Shams Engineering Journal*. 2015. Vol. 6. Issue 3. Pp. 725–733. DOI: 10.1016/j.asej.2015.01.001
7. Pala S., Özmen G. Lateral load analysis of multi-storey structures considering axial deformations // *Computers & Structures*. 1990. Vol. 34. Issue 4. Pp. 577–583. DOI: 10.1016/0045-7949(90)90235-T
8. Teh L.H., Uz M.E. Ultimate Shear-out capacities of structural-steel bolted connections // *Journal of Structural Engineering*. 2015. Vol. 141. Issue 6. P. 04014152. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001105
9. Xing H. Shear-out capacity of bolted connections in cold-reduced steel sheets. University of Wollongong thesis collections, 2019. 103 p.
10. Gimranov L., Fattakhova A. Shear stops forces distribution analysis in combined floors of multi-storey buildings // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 890. P. 012080. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012080
11. Фаттахова А.И. Влияние горизонтальных нагрузок на работу стэд-болтов в комбинированных плитах перекрытия // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 1. С. 31–42. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.31-42
12. Luttrell L., Mattingly J., Schult W., Sputo T. Diaphragm design manual. 4th ed. Steel Deck Institute, 2015. 405 p.
13. Dung-Myau Lue, Cheng-Yen Liao, Chien-Chien Chang, Wei-Ting Hsu. Improved analysis of bolted shear connection under eccentric loads // *Journal of Marine Science and Technology*. 2017. Vol. 25. No. 4. Pp. 373–382. DOI: 10.6119/JMST-017-0223-1
14. D'Antimo M., Demonceau J.F., Jaspert J.P., Latoura M., Rizzano G. Experimental and theoretical

analysis of shear bolted connections for tubular structures // *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. Vol. 138. Pp. 264–282. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.07.015

15. *Quimby T.B.* A Beginner's guide to the steel construction manual An introduction to designing steel structures using the AISC Steel Construction Manual, 15th ed. Alaska, 2017. 53 p.

16. Teh L., Uz M. Combined bearing and shear-out capacity of structural steel bolted connections // *Journal of Structural Engineering*. 2016. Vol. 142. Issue 11. P. 04016098. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001573

17. Фаттахова А.И. Анализ распределения усилий в сдвиговых упорах комбинированных перекрытий многоэтажных зданий с различным соотношением сторон // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2020. № 1 (733). С. 46–56. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-733-1-46-56

18. Molkens T., Dobrić J., Rossi B. Shear resistance of headed shear studs welded on welded plates in composite floors // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 197. P. 109412. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109412

19. Ling Y., Zheng Z., Yang T.Y., Ma H. Behaviour and modeling of the bearing capacity of shear stud connectors // *International Journal of Steel Structures*. 2019. Vol. 19. Issue 2. Pp. 650–659. DOI: 10.1007/s13296-018-0154-3

20. Shim H.B., Lee J.H. Shear force of headed shear studs, high-strength shear studs and steel plate embedded in concrete: An experimental study // *Materials Research Innovations*. 2015. Vol. 19. Issue sup8. Pp. S8–145. DOI: 10.1179/1432891715Z.0000000001645

Поступила в редакцию 18 мая 2021 г.

Принята в доработанном виде 12 августа 2021 г.

Одобрена для публикации 12 августа 2021 г.

О Б АВТОРАХ: **Линур Рафаилевич Гимранов** — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлических конструкций и испытаний сооружений; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; leenur@mail.ru;

Алеу Илсуровна Фаттахова — аспирант кафедры металлических конструкций и испытания сооружений; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; Fattakhova.Alsou@yandex.ru.

REFERENCES

1. Jonson R.P. *Designer's guide to Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures EN 1994-1-1*. Moscow, MGSU, 2012; 412. (rus.).
2. Almazov V.O., Arutyunyan S.N. Design of composite reinforced concrete slabs according to Eurocode 4 and Russian recommendations. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 8:51-65. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.8.51-65 (rus.).
3. Zamaliev F.S. To the calculation of steel-reinforced concrete floors with profiled steel flooring. *News of KSUAE*. 2016; 3(37):129-134. (rus.).
4. Ayrumyan E.L., Kamenshchikov N.I., Rummyantseva I.A. Features of design of monolithic slabs for steel

- concrete ceiling on profiled steel decking. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 9:21-26. (rus.).
5. Zamaliev F.S. To the calculation of the anchor connections of steel-concrete structures. *News of KSUAE*. 2019; 3(49):87-94. (rus.).
6. Farag R. Reliability assessment of wall-frame structures. *Ain Shams Engineering Journal*. 2015; 6(3):725-733. DOI: 10.1016/j.asej.2015.01.001
7. Pala S., Özmen G. Lateral load analysis of multi-storey structures considering axial deformations. *Computers & Structures*. 1990; 34(4):577-583. DOI: 10.1016/0045-7949(90)90235-T
8. Teh L.H., Uz M.E. Ultimate shear-out capacities of structural-steel bolted connections. *Journal of Structural Engineering*. 2015; 141(6):04014152. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001105
9. Xing H. *Shear-Out Capacity of Bolted Connections in Cold-Reduced Steel Sheets*. University of Wollongong thesis collections, 2019; 103.
10. Gimranov L., Fattakhova A. Shear stops forces distribution analysis in combined floors of multi-storey buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 890:012080. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012080
11. Fattakhova A.I. Impact of horizontal loads on the work of stud bolts in combined floor slabs. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(1):31-42. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.31-42 (rus.).
12. Luttrell L., Mattingly J., Schult W., Sputo T. *Diaphragm design manual*. 4th ed. Steel Deck Institute, 2015; 405.
13. Dung-Myau Lue, Cheng-Yen Liao, Chien-Chien Chang, Wei-Ting Hsu. Improved analysis of bolted shear connection under eccentric loads. *Journal of Marine Science and Technology*. 2017; 25(4):373-382. DOI: 10.6119/JMST-017-0223-1
14. D'Antimo M., Demonceau J.F., Jaspert J.P., Latoura M., Rizzano G. Experimental and theoretical analysis of shear bolted connections for tubular structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017; 138:264-282. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.07.015
15. Quimby T.B. *A Beginner's Guide to the Steel Construction Manual An introduction to designing steel structures using the AISC Steel Construction Manual, 15th edition*. Alaska, 2017; 53.
16. Teh L., Uz M. Combined bearing and shear-out capacity of structural steel bolted connections. *Journal of Structural Engineering*. 2016; 142(11):04016098. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001573
17. Fattakhova A.I. Stress-strain state analysis of composite floor constructions in multi-storey buildings with various sides ratio. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020; 1(733):46-56. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-733-1-46-56
18. Molkens T., Dobrić J., Rossi B. Shear resistance of headed shear studs welded on welded plates in composite floors. *Engineering Structures*. 2019; 197:109412. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109412
19. Ling Y., Zheng Z., Yang T.Y., Ma H. Behaviour and modeling of the bearing capacity of shear stud connectors. *International Journal of Steel Structures*. 2019; 19(2):650-659. DOI: 10.1007/s13296-018-0154-3
20. Shim H.B., Lee J.H. Shear force of headed shear studs, high-strength shear studs and steel plate embedded in concrete: An experimental study. *Materials Research Innovations*. 2015; 19(sup8):S8-145. DOI: 10.1179/1432891715Z.0000000001645

Received May 18, 2021.

Adopted in revised form on August 12, 2021.

Approved for publication on August 12, 2021.

BIONOTES: **Linur R. Gimranov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Metal Structures and Testing of Structures; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; leenur@mail.ru;

Alsou E. Fattakhova — postgraduate of the Department of Metal Structures and Testing of Structures; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; Fattakhova.Alsou@yandex.ru.

Экспериментально-теоретическое исследование прочности плит на продавливание

Н.Н. Трекин^{1,2}, Д.Ю. Саркисов³, С.В. Трофимов², В.В. Крылов^{4,2}, Е.Б. Евстафьева²

¹ Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений — «ЦНИИПромзданий» (ЦНИИПромзданий); г. Москва, Россия;

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

³ Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ); г. Томск, Россия;

⁴ 20 Центральный проектный институт — филиал АО 31 Государственного проектного института специального строительства (20 ЦПИ АО «31 ГПИСС»); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Вопросы прочности и деформативности железобетонных перекрытий при продавливании остаются в настоящее время недостаточно изученными, несмотря на имеющиеся многочисленные публикации в технической литературе. Представлены результаты экспериментальных исследований прочности на продавливание фрагментов сопряжения плоских железобетонных монолитных плит с колонной при статическом нагружении. Цель исследования — получение экспериментальных данных о напряженно-деформированном состоянии фрагмента монолитного перекрытия при статическом продавливании и разработка пространственной модели на основе метода конечных элементов с последующими численными исследованиями.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования проводились на испытательном стенде. Даны характеристики опытных образцов: размеры, армирование, класс бетона и арматуры. Описана установка для проведения испытаний. Для численного моделирования узла сопряжения плиты с колонной применялся программный комплекс ATENA, который позволяет осуществлять физически и геометрически нелинейные расчеты железобетонных конструкций с учетом реальной работы материалов, используемых при создании экспериментальных моделей.

Результаты. Выполнено сравнение результатов по разрушающей нагрузке, полученное при проведении эксперимента, с результатами численного моделирования методом конечных элементов и с результатами вычисления по методикам СП 63.13330.2018 и Еврокод 2. Получены эпюры распределения деформаций в арматуре и бетоне, разрушающие нагрузки и схемы распределения трещин образцов.

Выводы. Анализ экспериментальных и численных исследований позволил сформулировать условия прочности на продавливание плоских плит с продольным армированием и дать рекомендации по расчету на прочность при центральном нагружении. Напряжения в горизонтальной арматуре и нормальные напряжения сжатия в бетоне плиты в стадии разрушения от вертикального продавливания могут не достигать расчетных предельных значений. Методика их определения является предметом дальнейших исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: исследование, статическая нагрузка, безбалочная плита, прочность на продавливание, деформации, метод конечных элементов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Трекин Н.Н., Саркисов Д.Ю., Трофимов С.В., Крылов В.В., Евстафьева Е.Б. Экспериментально-теоретическое исследование прочности плит на продавливание // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 8. С. 1006–1014. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1006-1014

Experimental and theoretical study of the strength of plates for pressure

Nikolai N. Trekin^{1,2}, Dmitry Yu. Sarkisov³, Sergey V. Trofimov², Vladimir V. Krylov^{4,2},
Elizaveta B. Evstafeva²

¹ Central Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures;
Moscow, Russian Federation;

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

³ Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB); Tomsk, Russian Federation;

⁴ 20 Central Design Institute — branch of JSC 31 State Design Institute for Special Construction; Moscow,
Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The issues of strength and deformability of reinforced concrete floors during punching remain insufficiently studied at present, despite the numerous publications in the technical literature. This article presents the results of experimental studies of the punching shear strength of fragments of conjugation of flat reinforced concrete monolithic slabs with a column under static loading. The purpose of these studies was to obtain experimental data on the stress-strain state

of a fragment of a monolithic floor during static punching and to develop a spatial model based on the finite element method with subsequent numerical studies.

Materials and methods. Experimental studies were carried out on a test bench. The characteristics of prototypes are given: dimensions, reinforcement, class of concrete and reinforcement. A test setup is described. For the numerical simulation of the slab-column interface, the ATENA software package was used, which allows for physically and geometrically nonlinear calculations of reinforced concrete structures, taking into account the real work of the materials used to create experimental models.

Results. Comparison of the results for the breaking load, obtained during the experiment, with the results of numerical modeling by the finite element method and with the results of calculations using the methods of SP 63.13330.2018 and Eurocode 2. The diagrams of the distribution of deformations in reinforcement and concrete, breaking loads and patterns of distribution of cracks in the samples are obtained.

Conclusions. The analysis of experimental and numerical studies made it possible to formulate the conditions for the punching shear strength of flat slabs with longitudinal reinforcement and to give recommendations on the strength calculation under central loading.

KEYWORDS: research, static load, girderless slab, punching shear strength, deformation, finite element method

FOR CITATION: Trekin N.N., Sarkisov D.Yu., Trofimov S.V., Krylov V.V., Evstafeva E.B. Experimental and theoretical study of the strength of plates for pressure. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(8):1006-1014. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1006-1014 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы прочности и деформативности железобетонных перекрытий при продавливании остаются в настоящее время недостаточно изученными, несмотря на имеющиеся многочисленные публикации в технической литературе [1–14]. Методика расчета на статические воздействия, представленная в действующем СП 63.13330.2018, основана на предположениях, отличающихся от фактического напряженно-деформированного состояния (НДС) при продавливании, в частности, по схеме разрушения и распределения усилий на бетон, продольную и поперечную арматуру в предельном по прочности состоянии железобетонной плиты. В связи с этим изучение НДС сечений железобетонной плиты при продавливании — актуальная задача [15–17].

На основании вышеизложенного, цель настоящего исследования — получение экспериментальных данных о НДС фрагмента монолитного перекрытия при статическом продавливании и разработка пространственной модели на основе метода конечных элементов с последующими численными исследованиями.

Из-за сложности НДС при продавливании наиболее рациональным путем является экспериментально-теоретическое изучение процессов развития деформаций и напряжений от момента нагружения, трещинообразования и до предельного состояния по прочности [18].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования моделей были проведены в лаборатории испытания строительных конструкций в Томском государственном архитектурно-строительном

университете, сотрудники которого имеют опыт проведения таких работ^{1, 2, 3, 4}.

Экспериментальные исследования осуществлялись на испытательном стенде¹, включающем металлические тязи, прикрепленные посредством гаек к силовому полу, на которых располагалась опорная металлическая траверса. Экспериментальный образец устанавливался на специально изготовленную металлическую опору из прокатного металла с дополнительными ребрами жесткости, которая расположена на силовом полу. При этом было обеспечено свободное опирание образца по контуру. Пролет плиты в обоих направлениях составлял 500 мм. Сверху на колонную часть образца одевался металлический оголовок для распределения нагрузки. На оголовок устанавливался гидравлический домкрат ДГ-100, подключенный к масляной станции. Между домкратом и нижней поверхностью опорной траверсы

¹ Патент RU № 76117 U1. Тензометрическое устройство для измерения деформаций арматуры железобетонных конструкций / Плевков В.С., Однокопылов Г.И., Саркисов Д.Ю., Тигай О.Ю., Исмаилов Г.М.; заявка № 2008113329/22 от 07.04.2008; опублик. 10.09.2008.

² Патент RU № 48225 U1. Стенд для испытания железобетонных элементов на косоое внецентренное кратковременное динамическое растяжение / Плевков В.С., Саркисов Д.Ю.; заявка № 2005112503/22 от 25.04.2005; опублик. 27.09.2005.

³ Патент RU № 66534 U1. Установка для экспериментальных исследований строительных конструкций / Плевков В.С., Однокопылов Г.И., Саркисов Д.Ю., Тигай О.Ю., Однокопылова О.А.; заявка № 2007110136/22 от 19.03.2007; опублик. 10.09.2007.

⁴ Патент RU № 2401424 C1. Стенд для испытания железобетонных элементов на кратковременное динамическое сжатие / Плевков В.С., Однокопылов Г.И., Балдин И.В., Саркисов Д.Ю., Гончаров М.Е., Дзюба П.В.; заявка № 2009131954/28 от 24.08.2009; опублик. 10.10.2010.

сы располагался силоизмеритель для дополнительного контроля нагрузки на этапах испытания. Для получения сведений о деформациях бетона и арматуры использовались тензорезисторы базой 20 мм на арматуре и базой 50 мм на бетоне. Все тензорезисторы и силоизмеритель были подключены к измерительной системе МИС-036 для регистрации данных.

Схема установки для испытания фрагментов плит на продавливание показана на рис. 1.

Выбор размеров опытных образцов обусловлен техническими характеристиками данной установки, задачами эксперимента, возможностями изготовления и испытания моделей. Для проведения экспериментальных исследований плит перекрытия в режиме продавливания при действии статической нагрузки изготовлены квадратные образцы фрагментов плоских бескапитальных железобетонных плит с колоннами, их толщины составляли 100 и 120 мм.

Образцы выполнялись двух типов, которые отличались толщиной плитной части. Характеристики опытных образцов представлены в табл. 1 и на рис. 2.

По результатам экспериментальных исследований получены величины разрушающих нагрузок, а также схемы трещинообразования, которые показаны на рис. 3.

Теоретические исследования основаны на численном моделировании конструкции с соблюдением всех данных о геометрии конструкции и свойствах

материалов. При этом применяемая расчетная схема после проведения расчета уточнялась в целях большего приближения расчетной модели к натурной конструкции.



Рис. 1. Установка для испытания плит на продавливание
Fig. 1. Installation for testing slabs for punching

Табл. 1. Характеристики испытанных плит
Table 1. Characteristics of the tested boards

Маркировка образцов Sample marking	c , м / m	a , м / m	h , м / m	h_0 , м / m	Арматура Reinforcement	μ_s , %	R_b , МПа MPa	R_s , МПа MPa
$C_{h100}^{B20}-1$	0,1	0,6	0,1	0,076	Верхняя сетка $\varnothing 8$ шаг 100 Нижняя сетка $\varnothing 8$ шаг 100 Upper mesh $\varnothing 8$, step 100 Lower grid $\varnothing 8$, step 100	0,66	15,5	500
$C_{h120}^{B20}-1$	0,1	0,6	0,12	0,096	Верхняя сетка $\varnothing 8$ шаг 100 Нижняя сетка $\varnothing 8$ шаг 100 Upper mesh $\varnothing 8$ step 100 Bottom grid $\varnothing 8$ step 100	0,52	15,5	500

Примечание: c — ширина сечения колонны; h — высота плиты; h_0 — приведенная рабочая высота сечения; μ_s — коэффициент продольного армирования, используемый для нормативной оценки несущей способности узла сопряжения плиты и колонны по нормам⁵; R_b — средняя призматическая прочность, полученная по результатам лабораторных испытаний; R_s — предел текучести арматуры; маркировка образцов $C_{h100(120)}^{B20}$; C — статические испытания; B20 — тяжелый бетон класса B20; $h100$ (120) — высота плитной части образца 100 (120) мм.

Note: c — column section width; h is the height of the slab; h_0 — reduced working height of the section; μ_s — coefficient of longitudinal reinforcement used for the normative assessment of the bearing capacity of the slab and column interface according to the standards⁵; R_b — is the average prismatic strength obtained from the results of laboratory tests; R_s — yield strength of reinforcement; marking of samples $C_{h100(120)}^{B20}$; C — static tests; B20 — heavy concrete of class B20; $h100$ (120) — height of the slab part of the sample 100 (120) mm.

⁵ EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2. Design of concrete structures — Part 1–1: General rules and rules for buildings, Brussels : CEN, 2004.

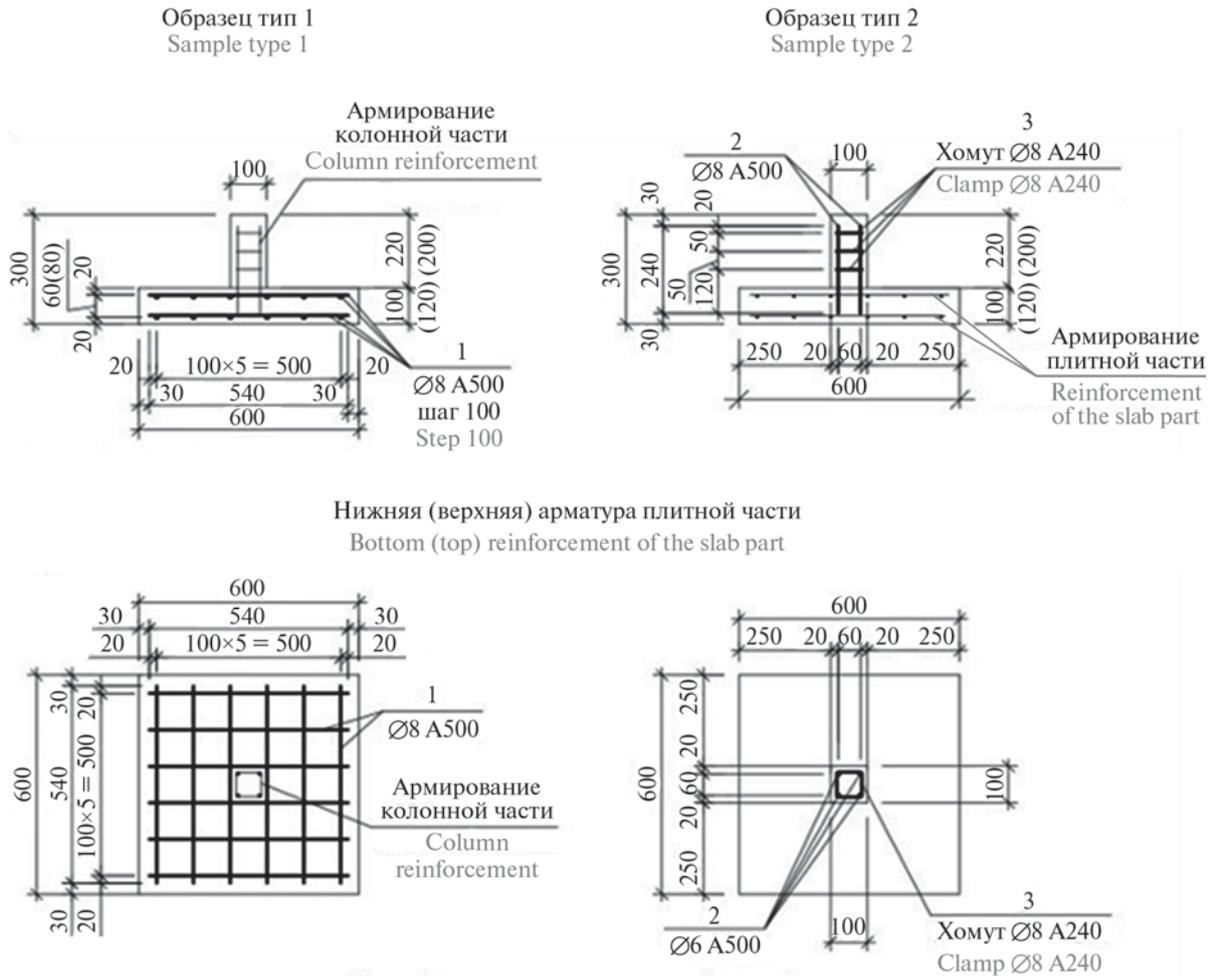


Рис. 2. Размеры и армирование опытных образцов
Fig. 2. Dimensions and reinforcement of prototypes

$C_{h120}^{B20} - 1$		$C_{h100}^{B20} - 1$	
Снизу / From below	Сверху / From above	Снизу / From below	Сверху / From above
Боковая 1 / Lateral 1	Боковая 2 / Lateral 2	Боковая 1 / Lateral 1	Боковая 2 / Lateral 2
Боковая 3 / Lateral 3			
<i>a</i>		<i>b</i>	

Рис. 3. Схемы трещинообразования при разрушающей нагрузке для образцов: $C_{h120}^{B20} - 1$ (a) и $C_{h100}^{B20} - 1$ (b)
Fig. 3. Schemes of cracking under breaking load for specimens: $C_{h120}^{B20} - 1$ (a); $C_{h100}^{B20} - 1$ (b)

Для численного моделирования узла сопряжения плиты с колонной применялся программный комплекс ATENA, который позволяет проводить физически и геометрически нелинейные расчеты железобетонных конструкций с учетом реальной работы материалов, используемых при создании экспериментальных моделей. Например, для железобетона учитывается: образование трещин, сцепление арматуры с бетоном и ряд других факторов [19, 20].

Расчетная модель представляла собой узел сопряжения плиты перекрытия и колонны (1/4 часть экспериментального образца). Арматурная сетка моделировалась стержневыми конечными элементами. Данные элементы не имеют изгибной жесткости и работают только на растяжение-сжатие. Расположение арматурных стержней строго соответствовало экспериментальным образцам.

Материал для колонны был принят упругий, с модулем упругости как у бетона. Плита, колонна и опорная плита моделировались объемными конечными элементами. На рис. 4 представлена 3D и конечно-элементная (КЭ) модель образца $C_{h100}^{B20} - 1$.

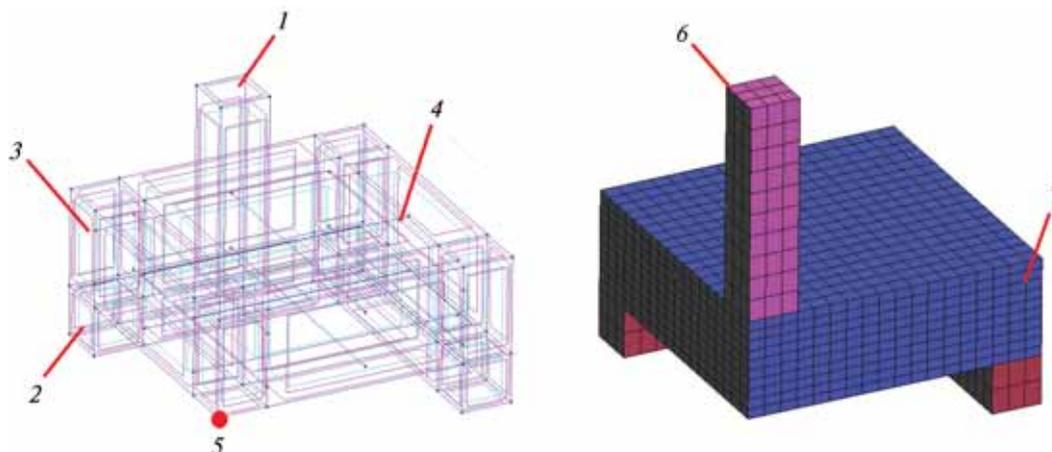


Рис. 4. 3D и КЭ модель из программного комплекса ATENA: 1 — колонна; 2 — опорная плита; 3 — плита перекрытия; 4 — арматурные стержни; 5 — точка мониторинга перемещений вдоль вертикальной оси; 6 — место приложения нагрузки; 7 — грань закрепления образца от смещения из плоскости симметрии

Fig. 4. 3D and FE model from ATENA software package: 1 — column; 2 — base plate; 3 — floor slab; 4 — reinforcing bars; 5 — monitoring point of displacements along the vertical axis; 6 — place of load application; 7 — face of fixing the sample from displacement from the plane of symmetry

Табл. 2. Сравнение полученных значений несущей способности из эксперимента и по расчетам
Table 2. Comparison of the obtained values of the bearing capacity from the experiment and by calculations

Номер No.	Маркировка образцов Sample marking	R_{exp} , кН / kN	R_{ATENA} , кН / kN	$R_{СП63}$, кН / kN	$R_{ЕС2}$, кН / kN	Δ_{ATENA} , %	$\Delta_{СП63}$, %	$\Delta_{ЕС2}$, %
1	$C_{h100}^{B20} - 1$	133,24	138	71	80	-3,57	47	40
2	$C_{h120}^{B20} - 1$	160,93	164,6	105	110	-2,28	35	32

Примечание: Δ — расхождение теоретических и экспериментальных данных в %.
Note: Δ — discrepancy between theoretical and experimental data in %.

Сравнение полученных значений несущей способности из эксперимента и по расчетам в программном комплексе ATENA, по методикам СП 63.13330 и ЕС2⁵ приведено в табл. 2.

Расхождения в значениях несущей способности при продавливании между результатами экспериментальных исследований и расчетов по отечественным нормам и по ЕС2⁵ в среднем составили: для СП63 — 41 %; по ЕС2⁵ — 36 %, а по КЭ модели — 2,95 %.

По результатам расчета образца $C_{h120}^{B20} - 1$ максимальные относительные деформации в арматуре в момент разрушения образца достигали $\epsilon_s = 0,00173$.

Среднее значение относительных деформаций, полученных в ходе проведения эксперимента, составило

$$\epsilon_{ср}^{эксп} = 0,001912. \quad (1)$$

Расхождение между результатами эксперимента и КЭ модели образца $C_{h120}^{B20} - 1$ по показаниям относительных деформаций в арматурных стержнях в момент разрушения:

$$\Delta \varepsilon = \frac{\varepsilon_{ср}^{эксп} - \varepsilon_s}{\varepsilon_{ср}^{эксп}} 100 = 9,5 \%. \quad (2)$$

Максимальные напряжения сжатия в бетоне у грани колонны в экспериментальных исследованиях достигали 5 МПа, а в КЭ модели — 6,6 МПа.

На рис. 5 приведена схема вертикальных перемещений при максимальной нагрузке и отмечено расположение трещин, формирующих пирамиду продавливания.

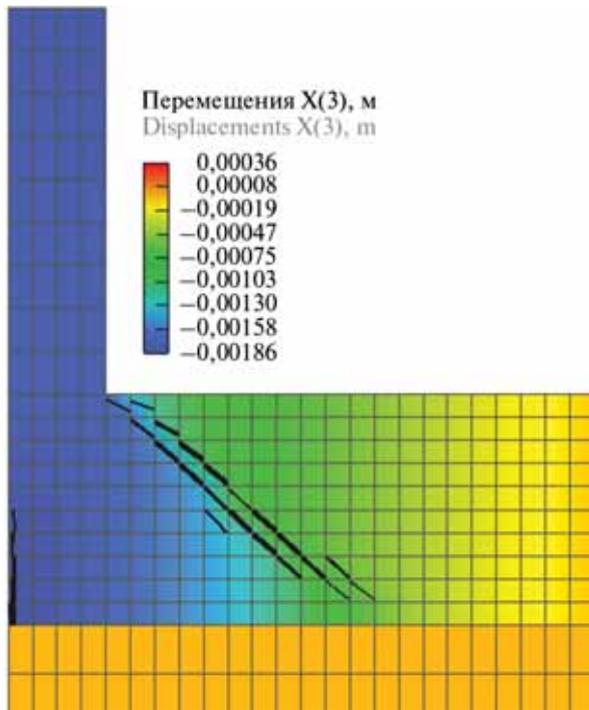


Рис. 5. Перемещения точек образца вдоль вертикальной оси в момент разрушения

Fig. 5. Displacement of sample points along the vertical axis at the moment of fracture

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты проведенных экспериментальных и теоретических исследований сопротивления узла сопряжения перекрытия с колонной продавливанию и анализ развития НДС образцов при нагружении до момента разрушения показали следующее:

- при наличии продольного армирования разрушение образца при образовании трещин в растянутой зоне не происходит, а образуется пара сил, формирующая сжатую зону бетона в пределах вершины пирамиды продавливания и растянутую из нижней арматуры;
- сопротивление вертикальной нагрузке оказывает сжатая зона бетона, сформированная поверхностью приведенной пирамиды продавливания, как это показано на рис. 6;
- бетон сжатой зоны в контурах приведенной пирамиды продавливания работает на срез с обжатием;
- сопротивление бетона срезу увеличивается за счет обжимающих усилий [21].

С учетом сделанных выводов несущую способность фрагмента плиты при центральном продавливании можно рассчитать из выражения:

$$F = A_{red} R_{sh,red} \quad (3)$$

где $R_{sh,red}$ — приведенная прочность бетона на срез, равная

$$R_{sh,red} = 2R_{bt}k, \quad (4)$$

где R_{bt} — сопротивление бетона на растяжение осевое; k — коэффициент увеличения прочности на срез при наличии бокового обжатия;

$$A_{red} = 4A_{red1},$$

где A_{red1} — площадь стороны приведенной пирамиды продавливания с учетом наклона граней

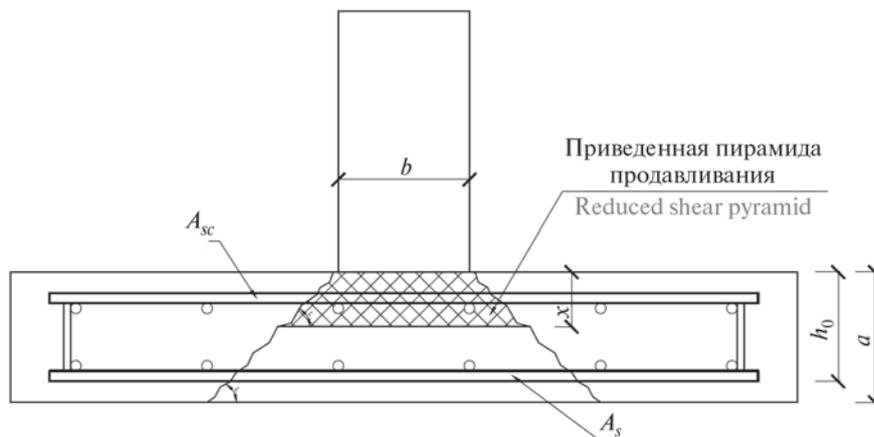


Рис. 6. Схема продавливания статической нагрузкой плоских плит с продольным армированием

Fig. 6. Diagram of static load punching of flat slabs with longitudinal reinforcement

$$A_{red1} = \frac{2(b+x)x}{\sqrt{2}}. \quad (5)$$

Высота сжатой зоны определяется из условия равновесия в нормальном сечении плиты у опорной зоны

$$\sigma_s A_s - \sigma_{sc} A'_s - \sigma_b A_{red1} = 0, \quad (6)$$

где σ_s — напряжение в нижней растянутой арматуре; σ_{sc} — напряжение в верхней сжатой арматуре; σ_b — напряжение в бетоне сжатой зоны.

В выражение (6) входят четыре неизвестных — x , σ_s , σ_{sc} , σ_b . Поэтому высоту сжатой зоны определим по опытным значениям напряжений. На основании экспериментальных исследований установлено, что для образца марки $C_{h100}^{B20} - 1$ среднее значение высоты сжатой зоны при максимальной нагрузке составило 3,5 см. При этом площадь боковой поверхности приведенной пирамиды продавливания — $A_{red} = 257 \text{ см}^2$. При напряжениях в сжатом бетоне, равных 6,5 МПа, коэффициент увеличения прочности на срез по работе [21] с учетом выражения (4) составил 1,7.

Несущая способность образца $C_{h100}^{B20} - 1$, определенная по представленным предложениям: $F_{sh} = 257 \cdot 3,4 \cdot 13,8 = 12\,058,5 \text{ кгс} = 120,5 \text{ кН}$, что имеет расхождение относительно экспериментального значения 9,8 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты испытаний фрагмента узла сопряжения перекрытия с колонной показали, что методика СП 63.13330.2018 дает заниженные результаты по разрушающей нагрузке при центральном продавливании. Это связано с отличием принятой расчетной схемы от фактического НДС в предельной стадии и недоучета повышения прочностных свойств бетона в условия объемного напряженного состояния.

Итоги экспериментальных и численных исследований на основе метода конечных элементов показали, что при центральном продавливании при наличии продольной арматуры в предельной стадии по несущей способности сопротивление срезу оказывает приведенная поверхность пирамиды продавливания, имеющая высоту, равную высоте сжатой зоны бетона.

При этом сопротивление срезу существенно повышается за счет бокового обжатия.

Напряжения в горизонтальной арматуре и нормальные напряжения сжатия в бетоне плиты в стадии разрушения от вертикального продавливания могут не достигать расчетных предельных значений. Методика их определения является предметом дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kumar V., Kartik K.V., Iqbal M.A. Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 206. P. 110125. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110125
2. Jun Yu, Li-zhong Luo, Qin Fang. Structure behavior of reinforced concrete beam-slab assemblies subjected to perimeter middle column removal scenario // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 208. P. 110336. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110336
3. Caldentey A.P., Diego Y.G., Fernández F.A., Santos A.P. Testing robustness: A full-scale experimental test on a two-storey reinforced concrete frame with solid slabs // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 240. P. 112411. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112411
4. Jinjie Men, Liquan Xiong, Jiachen Wang, Guanlei Fan. Effect of different RC slab widths on the behavior of reinforced concrete column and steel beam-slab subassemblies // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 229. P. 111639. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111639
5. Eladawy M., Hassan M., Benmokrane B., Ferrier E. Lateral cyclic behavior of interior two-way concrete slab-column connections reinforced with GFRP bars // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 209. P. 109978. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109978
6. Deifalla A. A mechanical model for concrete slabs subjected to combined punching shear and in-plane tensile forces // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 231. P. 111787. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111787
7. Yu J.L., Wang Y.C. Modelling and design method for static resistance of a new connection between steel tubular column and flat concrete slab // *Journal of Constructional Steel Research*. 2020. Vol. 173. P. 106254. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106254
8. Mao L., Barnett S.J., Tyas A., Warren J., Schleyer G.K., Zaini S.S. Response of small scale ultra high performance fibre reinforced concrete slabs to blast loading // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 93. Pp. 822–830. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.085
9. Клевцов В.А., Болгов А.Н. Действительная работа узлов безбалочной безкапитальной плиты перекрытия с колоннами при продавливании // *Бетон и железобетон*. 2005. № 3. С. 17–19.
10. Кремнев В.А., Кузнецов В.С., Талызова Ю.А. Расчет прочности на продавливание плиты безбалочного безкапитального перекрытия // *Вестник МГСУ*. 2014. № 10. С. 34–40.
11. Филатов В.Б. Силовое сопротивление железобетонных монолитных плоских плит перекрытий при продавливании колоннами прямоугольного сечения // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. № 4–5. С. 1322–1324.

12. Филатов В.Б., Бубнов Е.П. Экспериментальные исследования прочности плоских железобетонных плит при продавливании // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 2. С. 86–91.

13. Краснощеков Ю.В., Комлев А.А. Прочность плиты безбалочного перекрытия на участках соединения с колоннами // Бетон и железобетон. 2011. № 1. С. 25–27.

14. Самохвалова Е.О., Иванов А.Д. Стык колонны с безбалочным бескапитальным перекрытием в монолитном здании // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 3 (5). С. 33–37.

15. Пекин Д.А. Влияние изгиба на механизм продавливания опорной зоны железобетонной плиты // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 10. С. 20–28. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.10.20-28

16. Трекин Н.Н., Крылов В.В. К вопросу о несущей способности железобетонных плит на продавливание при динамическом нагружении на объектах

наземной космической инфраструктуры // Научный аспект. 2018. Т. 7. № 4. С. 771–778.

17. Trekin N., Pekin D. Experimental research of punching shear mechanism of reinforcing concrete slab // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 04032. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704032

18. Клованич С.Ф., Шеховцов В.И. Продавливание железобетонных плит. Натурный и численный эксперименты. Одесса : ОНМУ, 2011. 119 с.

19. Крылов В.В., Саркисов Д.Ю., Эргешов Э.Т., Евстафьева Е.Б. Программа экспериментальных исследований несущей способности безбалочных плит на продавливание при динамическом нагружении. Конструкции опытных образцов // Строительные материалы и изделия. 2020. Т. 3. № 3. С. 47–53.

20. Cervenka V., Jendele L., Cervenka J. ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. Prague : Cervenka Consulting, 2020. 344 p.

21. Петров А.Н. Экспериментальные исследования бетона при нагружении сжатием и срезом // Бетон и железобетон. 1965. № 11. С. 34–37.

Поступила в редакцию 21 мая 2021 г.

Принята в доработанном виде 12 августа 2021 г.

Одобрена для публикации 12 августа 2021 г.

О Б АВТОРАХ: Николай Николаевич Трекин — начальник отдела № 1; **Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений** — «ЦНИИ-Промзданий» (ЦНИИПромзданий); 127238, г. Москва, Дмитровское ш., д. 46, корп. 2; доктор технических наук, профессор; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 453689; nik-trekin@yandex.ru;

Дмитрий Юрьевич Саркисов — кандидат технических наук, доцент; **Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ)**; 634003, г. Томск, Соляная площадь, д. 2; РИНЦ ID: 714202, Scopus: 57194241456, ORCID: 0000-0003-3657-2273; Milandd@yandex.ru;

Сергей Владиславович Трофимов — бакалавр; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; serkeypro@yandex.ru;

Владимир Владимирович Крылов — директор; **20 Центральный проектный институт — филиал АО 31 Государственного проектного института специального строительства (20 ЦПИ АО «31 ГПИСС»)**; 129085, г. Москва, пр-т Мира, д. 101 Д; аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 975571; albet-group@yandex.ru;

Елизавета Борисовна Евстафьева — специалист I категории сектора инжиниринговых услуг Научно-исследовательского института экспертизы и инжиниринга; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 716875; ipevstafeva@yandex.ru.

REFERENCES

1. Kumar V., Kartik K.V., Iqbal M.A. Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading. *Engineering Structures*. 2020; 206:110125. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110125

2. Jun Yu, Li-zhong Luo, Qin Fang. Structure behavior of reinforced concrete beam-slab assemblies subjected to perimeter middle column removal scenario. *Engineering Structures*. 2020; 208:110336. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110336

3. Caldentey A.P., Diego Y.G., Fernández F.A., Santos A.P. Testing robustness: A full-scale experimental test on a two-storey reinforced concrete frame with solid slabs. *Engineering Structures*. 2021; 240:112411. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112411

4. Jinjie Men, Liquan Xiong, Jiachen Wang, Guanlei Fan. Effect of different RC slab widths on the behavior of reinforced concrete column and steel beam-slab sub-

assemblies. *Engineering Structures*. 2021; 229:111639. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111639

5. Eladawy M., Hassan M., Benmokrane B., Ferriter E. Lateral cyclic behavior of interior two-way concrete slab-column connections reinforced with GFRP bars. *Engineering Structures*. 2020; 209:109978. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109978

6. Deifalla A. A mechanical model for concrete slabs subjected to combined punching shear and in-plane tensile forces. *Engineering Structures*. 2021; 231:111787. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111787

7. Yu J.L., Wang Y.C. Modelling and design method for static resistance of a new connection between steel tubular column and flat concrete slab. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020; 173:106254. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106254

8. Mao L., Barnett S.J., Tyas A., Warren J., Schleyer G.K., Zaini S.S. Response of small scale ultra high performance fibre reinforced concrete slabs to blast loading. *Construction and Building Materials*. 2015; 93:822-830. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.085

9. Klevtsov V.A., Bolgov A.N. Actual work of the nodes of a flat, girderless, non-captive floor slab with columns during punching. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2005; 3:17-19. (rus.).

10. Kremnev V.A., Kuznetsov V.S., Talyzova Yu.A. Burst strength analysis for a plate of girderless capitelless floor. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 10:34-40. (rus.).

11. Filatov V.B. Power resistance of the ferroconcrete monolithic flat plates of floorings at punching by rectangular columns. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012; 14(4):(5):1322-1324. (rus.).

12. Filatov V.B., Bubnov E.P. Experimental investigation of punching shear strength of flat reinforced

concrete slabs. *Industrial and Civil Engineering*. 2017; 2:86-91. (rus.).

13. Krasnoshchekov Yu.V., Komlev A.A. Strength of a flat slab in the areas of connection with columns. *Concrete and reinforced concrete*. 2011; 1:25-27. (rus.).

14. Samokhvalova E.O., Ivanov A.D. Column joint with girderless drip-free overlap in a monolithic building. *Engineering and Construction Journal*. 2009; 3:33-37. (rus.).

15. Pekin D.A. Bending effect on the mechanism of punching the support zone of the reinforced concrete slab. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 10:20-28. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.10.20-28 (rus.).

16. Trekin N.N., Krylov V.V. On the issue of the bearing capacity of reinforced concrete slabs for punching under dynamic loading on objects of ground space infrastructure. *Scientific aspect*. 2018; 7(4):771-778. (rus.).

17. Trekin N., Pekin D. Experimental research of punching shear mechanism of reinforcing concrete slab. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:04032. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704032

18. Klovanich S.F., Shekhovtsov V.I. *Extrusion of reinforced concrete slabs. Natural and Numerical Experiments*. Odessa, ONMU, 2011; 119. (rus.).

19. Krylov V.V., Sarkisov D.Yu., Ergeshov E.T., Evstafyeva E.B. Program of experimental studies of the load-bearing capacity of girderless plates for pushing under dynamic loading. Design of prototypes. *Construction Materials and Products*. 2020; 3(3):47-53. (rus.).

20. Cervenka V., Jendele L., Cervenka J. *ATENA Program Documentation. Part 1. Theory*. Prague, Cervenka Consulting, 2020; 344.

21. Petrov A.N. Experimental studies of concrete under compression and shear loading. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1965; 11:34-37. (rus.).

Received May 21, 2021.

Adopted in revised form on August 12, 2021.

Approved for publication on August 12, 2021.

BIONOTES: Nikolai N. Trekin — Head of Department No. 1; **Central Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures**; 2 build. 46 Dmitrovskoe shosse, Moscow, 127238, Russian Federation; Doctor of Technical Sciences, Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 453689; nik-trekin@yandex.ru;

Dmitry Yu. Sarkisov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB)**; 2 Salt Square, Tomsk, 634003, Russian Federation; ID RISC: 714202, Scopus: 57194241456, ORCID: 0000-0003-3657-2273; Milandd@yandex.ru;

Sergey V. Trofimov — bachelor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; serkeypro@yandex.ru;

Vladimir V. Krylov — director; **20 Central Design Institute — branch of JSC 31 State Design Institute for Special Construction**; postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 975571; albet-group@yandex.ru;

Elizaveta B. Evstafeva — specialist of the 1st category of the sector of engineering services, Research Institute of Expertise and Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 716875; ipevstafeva@yandex.ru.

Проверка живучести конструктивных систем из сборного железобетона по методу энергетического баланса

В.В. Тур, А.В. Тур, А.А. Лизогуб

Брестский государственный технический университет (БрГТУ); г. Брест, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Требования, касающиеся обеспечения живучести конструктивных систем, следует выполнять на стадии концептуального проектирования с учетом применения различных стратегий защиты от прогрессирующего обрушения. По сравнению с конструктивными системами из монолитного железобетона, системы, образованные из сборных железобетонных элементов, являются более восприимчивыми к эффектам от особых воздействий. Для обеспечения целостности поврежденной системы в исходной сборной конструктивной системе необходимо предусматривать (резервировать) достаточное количество горизонтальных (внутренних и периметрических) и вертикальных связей, обладающих требуемой степенью неразрывности и пластической деформативности.

Материалы и методы. Использовали аналитические модели сопротивления горизонтальных связей, основанные на уравнениях энергетического баланса системы.

Результаты. На реальном примере сборного перекрытия выполнен расчет требуемых параметров горизонтальных связей по предложенным зависимостям, основанным на модели энергетического баланса системы и расчетных моделях, включенных в нормы различных стран. Сравнение полученных результатов показало, что расчетные модели норм в ряде случаев могут давать небезопасный результат, занижая требуемую площадь сечения горизонтальных связей. Это объясняется тем, что практически все зависимости для расчета связевых усилий опираются на постоянные значения предельного прогиба (как правило, от 1/6 до 1/10 пролета) без проверок предельной деформативности горизонтальных связей.

Выводы. Установлено, что деформативность связей — один из базовых параметров, которые следует контролировать при проверке живучести конструктивных систем из сборного железобетона. Предложенный метод, основанный на положениях энергетического баланса, позволяет учесть предельную деформативность горизонтальных связей при определении мембранных (цепных) усилий и вычислить максимальную динамическую реакцию поврежденной конструктивной системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: живучесть, прогрессирующее обрушение, метод энергетического баланса, горизонтальные связи, сборный железобетон, мембранный эффект, динамическое сопротивление

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тур В.В., Тур А.В., Лизогуб А.А. Проверка живучести конструктивных систем из сборного железобетона по методу энергетического баланса // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 8. С. 1015–1033. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1015-1033

Checking of the robustness of precast structural systems based on the energy balance method

Viktor V. Tur, Andrei V. Tur, Aliaksandr A. Lizahub

Brest State Technical University (BrSTU); Brest, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. The robustness requirements should be fulfilled already at the stage of conceptual design of the structural system, taking into account the use of various strategies for its protection from progressive collapse. Compared to monolithic reinforced concrete structural systems, precast concrete systems are more susceptible to the effects of accidental actions. To ensure the integrity of the damaged system in the original prefabricated structural system, it is necessary to provide (reserve) a sufficient number of horizontal (internal and perimetric) and vertical ties with the required degree of continuity and plastic deformability.

Materials and methods. Analytical models of the resistance of horizontal ties based on the equations of the energy balance of the system.

Results. On a real example of a prefabricated floor, calculations of the required parameters of horizontal ties were performed according to the proposed dependencies, based on the model of the energy balance of the system and the design models included in the standards of various countries. Comparison of the results obtained showed that the calculation models of the norms in a number of cases can give an unsafe result, underestimating the required cross-sectional area of horizontal ties. This is due to the fact that all dependencies for calculating the tie forces are based on constant values of the ultimate deflection (usually from 1/6 to 1/10 of the span) without checking the limiting deformability of horizontal ties.

Conclusions. Deformability of ties is one of the basic parameters that should be monitored when checking the robustness of structural systems made of precast concrete. The proposed method, based on the provisions of the energy balance, makes it possible to take into account the limiting deformability of horizontal ties when determining the membrane (chain) forces and calculate the maximum dynamic response of the damaged structural system.

KEYWORDS: robustness, progressive collapse, energy balance method, horizontal ties, precast concrete, membrane effect, dynamic resistance

FOR CITATION: Tur V.V., Tur A.V., Lizahub A.A. Checking of the robustness of precast structural systems based on the energy balance method. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(8):1015-1033. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1015-1033 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Резонансные строительные катастрофы, имевшие место в течение последнего столетия [1–3], показали, что проверку живучести конструктивных систем в особых расчетных ситуациях следует рассматривать как одну из важнейших составных частей проектирования и конструирования элементов строительных сооружений. При этом требования, касающиеся обеспечения живучести, следует выполнять на стадии концептуального проектирования конструктивной системы с учетом применения различных стратегий ее защиты от прогрессирующего обрушения.

В научно-технической литературе представлен целый ряд определений термина «живучесть» [1–8].

Например, в рекомендациях Fib Bulletin 43¹ конструктивную живучесть определяют как нечувствительность конструктивной системы к локальному разрушению (повреждению). Под нечувствительностью в данном контексте понимают такое состояние модифицированной конструктивной системы, когда повреждения отдельных элементов (умеренные по отношению к системе в целом) вызывают только незначительные изменения в ее поведении (реакции) в силу того, что система способна перераспределять дополнительные эффекты, появляющиеся после реализации особого воздействия, показывая пластичность, а не хрупкую форму глобального (прогрессирующего) обрушения.

В действующих нормах² и кодексе-образце Fib MC 2010³ требование проверки живучести установлено неявно для случаев, когда это продиктовано такими событиями, как пожары, взрывы, удары транспортных средств в элементы здания, последствия человеческих ошибок, допущенных на различных этапах существования конструкции.

Необходимо отметить, что практически все известные определения термина «живучесть» [2] бази-

руются главным образом на феномене непропорционального обрушения и только немногие, например [6, 8], рассматривают живучесть как аспект безопасности конструктивной системы.

Положения, разрабатываемые в проекте нового кодекса Fib MC 2020⁴, относящиеся к оценке живучести конструктивных систем, базируются на формате оценивания рисков, как это представлено в ISO 2394:2015⁵. Согласно Fib MC 2020 проверки живучести конструкции должны включать следующие основные этапы: 1) идентификация предполагаемой угрозы (H) или перечня угроз, которым, вероятнее всего, может подвергаться конструктивная система в процессе эксплуатации. Стоит принимать во внимание, что значительная часть угроз может оказаться неидентифицированной (например, террористические и/или криминальные атаки); 2) определение локального сопротивления отдельного элемента (D). Это относится в основном к проверкам сопротивления так называемых ключевых элементов, непосредственно воспринимающих особое воздействие (например, стеновая панель при взрыве бытового газа); 3) установление последующего непрямого повреждения системы (S), следующего за прямым локальным разрушением, описываемое также, как прогрессирующее обрушение; 4) количественное определение величин прямых C_{dir} и не прямых C_{ind} последствий, включая экономические, социальные, экологические потери, а также стоимость утраты человеческих жизней (человеческие жертвы) в монетарном выражении согласно ISO 2394:2015. Прямые затраты (ущерб) обычно локализованы в итоге повреждения отдельных элементов, когда не прямые (косвенные) потери связаны с утратой функциональности системы, как результат реализации прямых потерь. Полный риск R_{tot} , связанный с отказом системы в особой расчетной ситуации, рассчитывают согласно ISO 2394:2015.

Ключевые стратегии защиты конструктивных систем от прогрессирующего обрушения и требования к проверкам живучести конструктивных систем из железобетона подробно изложены в DoD 2005 UFC 4-023-03, ТКП EN 1991-1-7 [1, 9–17].

Стратегия альтернативных путей передачи нагрузки (ALP) или альтернативных траекторий в явном виде исследует сопротивление поврежденной конструктивной системы прогрессирующему обру-

¹ Fib Bulletin 43: Structural connections for precast concrete buildings // Guide to good practice. 2008.

² СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. Минск, 2020; СН 2.01.01-2019. Основы проектирования строительных конструкций, Минск, 2020; ТКП EN 1991-1-7. Общие воздействия. Часть 7 — Особые воздействия; BS 8110-1:1997. Structural use of concrete — Part 1: Code of practice for design and construction; DoD 2005 UFC 4-023-03. Design Building to Resist Progressive Collapse.

³ Fib Model Code for Concrete Structures 2010 // International Federation for Structural Concrete (fib). Lausanne, Switzerland, 2010.

⁴ Fib Model Code for Concrete Structures 2020 // International Federation for Structural Concrete (fib).

⁵ ISO 2394:2015. General principles on reliability of structures // International Standard. 2015.

шению (т.е. «непрямое» или «следующее за...»), когда степень начального повреждения конструктивной системы уже установлена (вынужденно, по специальным правилам удалены из конструктивной системы ключевые элементы). Следовательно, данная стратегия рассматривается как способ снижения вероятности $P[S|D \cap H]$.

Меры, посредством которых достигается снижение этой вероятности в рамках данной стратегии, включают:

- разработку интегрированной системы горизонтальных и вертикальных связей, обеспечивающих восприятие особого сочетания воздействий (при $A_d = 0$) и перераспределение усилий в поврежденной системе с учетом цепных (мембранных) усилий, возникающих в плитах и балках деформированной системы (при обеспеченной возможности реализации больших прогибов), а также балочных эффектов в стенах;
- проектирование резервных несущих элементов в системе, создание резервов сопротивления элементов и ограничение числа элементов системы, которые могут получить необратимые локальные повреждения при реализации особого события.

Стратегия, направленная на снижение последствий наступления отказа, имеет целью ограничить неприемлемые (непропорциональные) последствия (C_{ind} и/или $P[S|D \cap H]$), появляющиеся в результате реализации локального повреждения D . Данная стратегия обеспечивается через требования к компоновке конструктивной системы (например, изменение направления пролетов в плитах перекрытий), объемно-планировочного решения здания (строительного сооружения), а также его расположения на генплане.

Стратегия контроля событий ($P(H)$) включает меры по предотвращению появления предварительно идентифицированного набора угроз (H) и ограничивает частоту их появления до приемлемого уровня. Данная стратегия не повышает, а вообще не влияет на сопротивление конструктивной системы. Меры, связанные с контролем угроз, включают, например, выбор строительной площадки, ограничения в использовании строительного сооружения, установку систем контроля безопасности, защитных барьеров и т.д. Кроме того, к этим мерам относят контроль качества при проектировании для предотвращения человеческих ошибок и рекомендации по техническому обслуживанию.

Стратегия проектирования ключевых элементов ориентирована на предотвращение локального разрушения D (часто определяемого как «прямое разрушение»), вызванного непосредственно угрозой H , и снижения вероятности $P[D|H]$. Под ключевым элементом в рамках этой стратегии понимают элементы и соединения, которые являются необходимыми для обеспечения сопротивления исходной конструктивной системы в целом.

В настоящей статье рассмотрим более детально реализацию только первой стратегии, принимая во внимание то обстоятельство, что оставшиеся три стратегии могут также оказывать существенное влияние на ограничение прогрессирующего обрушения системы, особенно в случае идентифицированных особых воздействий. Таким образом, в рамках первой стратегии следует выполнять проверку сопротивления поврежденной конструктивной системы после наступления особого события, т.е. подтверждать расчетом, что конструктивная система способна мобилизовать в поврежденном состоянии альтернативные пути (траектории) передачи нагрузки, обладая при этом минимальным запасом несущей способности и пластической деформативности. Здесь важную роль играет степень статической неопределенности исходной (неповрежденной) конструктивной системы.

В общем случае интегральную целостность конструктивной системы здания обеспечивают применением комбинации горизонтальных (внутренних и периметрических) и вертикальных связей, размещаемых в элементах перекрытия, колоннах и стенах. По сути, в особой расчетной ситуации систему связей следует рассматривать как «вторую линию защиты» конструктивной системы здания после исчерпания изгибного сопротивления ее элементов.

При удалении колонны или участка стены и развитии больших прогибов в работу должна включаться система связей, обеспечивая восприятие действующих эффектов воздействий. Так, например, колонна многоэтажного здания, находящаяся непосредственно над разрушенным узлом, воспринимает опорные реакции балок на этом уровне как элемент вертикальной подвески.

В случае удаления внутренней опоры в элементах перекрытия последовательно (в зависимости от величины вертикального перемещения и граничных условий) могут реализовываться арочный, изгибный (балочный) и мембранный (цепной) эффекты. Если прогиб перекрытия превысит критическое значение, связи (связевые элементы) либо разрушатся, либо потеряют анкеровку в соседних пролетах, что будет свидетельствовать о превышении предельного состояния.

По сравнению с конструктивными системами из монолитного железобетона, системы, образованные из сборных железобетонных элементов, являются более восприимчивыми к эффектам от особых воздействий. Это обусловлено главным образом наличием в таких конструктивных системах различных типов стыковых соединений, посредством которых обеспечивается интегральная целостность конструктивной системы и неразрывность в передаче усилий. При этом в сборных системах различают соединения, работающие на растяжение, сжатие, изгиб, кручение, сдвиг. При проектировании зданий из сборного железобетона сохраняются все требования, относящиеся как к стратегиям защиты от прогрессирующего

разрушения, так и к проверкам живучести конструктивной системы.

Хотя в традиционных системах из сборного железобетона наличие сил трения по контакту элементов, ограничение деформаций на опорах (арочный эффект) и сварные соединения закладных деталей несколько повышают сопротивление системы при действии вертикальных (гравитационных) нагрузок, однако такие соединения не могут обеспечить достаточного сопротивления конструктивной системы в особых расчетных ситуациях. Таким образом, для соблюдения целостности поврежденной системы в исходной сборной конструктивной системе необходимо предусматривать (резервировать) достаточное количество связей, обладающих требуемой степенью неразрывности и пластической деформативности. Неразрывность связей обеспечивает восприятие особого сочетания воздействий путем мобилизации альтернативных путей передачи усилий после удаления опоры. В свою очередь, пластическая деформативность (способность получать значительные пластические удлинения связей до разрыва) важна с точки зрения перераспределения усилий, получения больших прогибов, необходимых для реализации цепного (мембранного) эффекта, а также как мера, способствующая поглощению энергии (демпфирование) при динамическом приложении особого воздействия после утраты элементами системы вертикальной опоры.

В конструктивных системах из сборного железобетона на стадии рассмотрения планировочных решений должны быть выявлены все ключевые элементы, разрушение которых может привести к непропорциональным обрушениям системы. Поэтому на первом этапе рекомендуется детально проанализировать сопротивление ключевых элементов, как это, например, выполняют при проектировании панельных зданий.

При проектировании систем из сборного железобетона особое место отводится проектированию связевых элементов, обеспечивающих альтернативные пути передачи напряжений. При использовании вычислительных комплексов особую роль приобретает адекватное моделирование связей. Следует отметить, что в рамках двухстадийного проектирования проверку живучести конструктивной системы с применением нелинейных статических или динамических моделей, учитывающих пространственную работу строительного сооружения, предваряет проектирование системы связей. Естественно, что проектирование связей на этом этапе должно опираться на достаточно простые, но ясные и наполненные физическим смыслом и обоснованные зависимости (Albert Einstein: «Make everything as simple as possible, but not simpler»). В настоящей статье приведены аналитические зависимости для проектирования горизонтальных связей в дисках перекрытий, полученные на основе положений энергетического подхода, из-

ложенного в работах [10–13]. На реальном примере сборного перекрытия выполнено сравнение результатов расчетов требуемых параметров горизонтальных связей по предложенному методу и расчетным моделям, включенным в нормы различных стран (СП 5.03.01-2020; СН 2.01.01-2019; ТКП EN 1991-1-7; BS 8110-1; DoD 2005 UFC 4-023-03; Fib MC 2010; ASCE 2013; ПКЗ 2002). Установлено, что деформативность связей является одним из базовых параметров, которые необходимо контролировать при расчете связей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Аналитические модели сопротивления горизонтальных связей, основанные на уравнениях энергетического баланса системы

Мембранные (цепные) эффекты в поврежденной конструктивной системе

Как было показано выше, резервирование альтернативных путей (траекторий) передачи усилий (нагрузок) рассматривают как основную стратегию защиты конструктивной системы от прогрессирующего обрушения. Альтернативные пути передачи нагрузки в поврежденной конструктивной системе реализуются главным образом через так называемые «цепные» (или «мембранные») эффекты для плит перекрытий, консольные и балочные эффекты для сборных стен, вертикальные подвески стен и колонн, диафрагменный эффект в плоскости перекрытий. При реализации цепного (мембранного) механизма в поврежденной конструктивной системе все вертикальные (гравитационные) нагрузки воспринимаются за счет реакций в растянутых горизонтальных связях, действующих вдоль линии выделенных элементов.

Как следует из работы [2], несмотря на то, что до настоящего времени нет единого мнения о положении переходной точки, соответствующей вертикальному прогибу, после которого в работу включаются горизонтальные связи, и реализуется цепной или мембранный эффект, общепринято, что это состояние, при переходе через которое сжимающие осевые усилия изменяют свой знак и становятся растягивающими, либо состояние, при котором ненагруженные связевые элементы начинают активно воспринимать растягивающие усилия.

В рамных каркасах первоначально реализуется балочный эффект (beam-end-moment effect), а затем вслед за образованием, включением в работу и исчерпанием сопротивления изгибных пластических шарниров в опорных сечениях (при малых вертикальных перемещениях) происходит переход к цепным (мембранным) усилиям при развитии больших прогибов.

Необходимо подчеркнуть, что в соответствии с требованиями норм и рекомендаций (СП 5.03.01-2020; ТКП EN 1991-1-7; BS 8110-1; DoD 2005 UFC 4-023-

03; Fib MC 2010; ASCE 2013; PK3 2002), расчет ценных (мембранных) усилий в деформированной конструктивной системе выполняют, как правило, отдельно без учета ее изгибного поведения при образовании пластических шарниров.

Как уже подчеркивалось ранее, появление мембранных или цепных усилий следует рассматривать как «вторую линию защиты» конструктивной системы от прогрессирующего обрушения при условии, что оставшаяся после первоначального повреждения часть конструктивной системы способна обеспечить мобилизацию альтернативных путей передачи нагрузки, при которых в элементах перекрытий (балках и плитах) после достижения больших прогибов будут гарантированно обеспечены значительные по величине пластические деформации.

Допущения, принятые при разработке упрощенных аналитических моделей

В расчетных моделях, применяемых для проверок поврежденных конструктивных систем после удаления ключевых элементов, используют преимущества метода больших перемещений и эффектов пластической деформативности связей (стыковых соединений). Для таких конструктивных систем следует ожидать, что их сопротивление в значительной степени будет зависеть от динамических эффектов, возникающих при переходе к деформированной схеме в результате особого воздействия, а также нелинейного поведения связей (стыковых соединений). Основные положения упрощенной модели для проверок модифицированных систем с альтернативными путями передачи нагрузок, основанные на применении энергетического подхода, были сформулированы в работах [10–13]. Рассматриваемую модель применяют к поврежденным несущим системам, для которых сопротивление определяется в основном сопротивлением связей, воспринимающих растяжение. Однако базовые принципы могут быть применены также и при анализе других механизмов разрушения, в которых деформации локализуются в связевых элементах (например, связи сжатия, сдвига, комбинированные связи). При этом, принимая во внимание возможные механизмы обрушения конструктивной системы, разработка аналитических моделей сопротивления горизонтальных связей растяжения выполнена, опираясь на следующие допущения:

1) считается, что ключевые опорные элементы мгновенно удаляются из конструктивной системы непосредственно после приложения к ним особого воздействия;

2) на поврежденную систему с удаленным элементом действуют только гравитационные нагрузки (особое сочетание включает характеристическое значение собственного веса + других постоянных нагрузок + практически постоянное значение переменной нагрузки). Вопросы, относящиеся к выбору особых расчетных сочетаний нагрузок при проверках

модифицированных систем, изучены в трудах [18, 19];

3) отдельные сборные элементы в процессе вертикального перемещения системы рассматриваются как абсолютно жесткие тела, соединенные податливыми связями;

4) сопротивление поврежденной несущей системы зависит только от определенных критических связей в соединениях, в которых в процессе перемещения конструктивной системы в месте удаления опорного элемента развиваются максимальные усилия;

5) при этом считается, что в исходном состоянии непосредственно перед удалением опоры связи в соединениях, обеспечивающих альтернативную передачу усилий, являются ненагруженными (ненапряженными).

Гравитационные силы моделируют результирующей $Q = mg$, приложенной в центре тяжести сборных элементов. Фактическое положение поврежденной системы определяется обобщенным перемещением a_q в центре тяжести и углом поворота θ (здесь в общем случае a_{qz} — вертикальная компонента перемещения). Согласно сформулированным допущениям 2) и 4) представляется возможным установить простые геометрические соотношения между вертикальным перемещением системы a_{qz} и перемещением (пластическим удлинением) w_i связи в стыковом соединении. Для каждого стыкового соединения нелинейное поведение связи под нагрузкой следует описывать зависимостью $N-w_i$ связывающей растягивающее усилие в стыковом соединении с перемещением (см. раздел «Моделирование связевых элементов»).

Моделирование динамического сопротивления конструктивной системы на основе энергетического баланса. Расчетные уравнения

После удаления колонны вертикальные перемещения системы практически не ограничиваются вплоть до момента включения горизонтальных связей (допущение 5). Следовательно, при движении вниз система приобретает ускорение. Равнодействующую связевых усилий в альтернативной поврежденной системе можно рассматривать как сопротивление системы R , уравновешивающее гравитационную силу, действующую в ее центре тяжести (центре масс). При этом сопротивление может быть определено как статическое (квазистатическое) или динамическое. В рамках общего энергетического подхода [10–13] статическое сопротивление изменяется в зависимости от величины перемещения и может быть описано функцией сопротивления $R_{stat}(a_{qz})$, связанной, в свою очередь, с зависимостью $N-w$ для пластических связей в соединениях сборных элементов.

В общем случае для определенного вертикального перемещения a_q и угла поворота θ движущейся

системы условие энергетического баланса может быть записано:

$$\frac{m}{2} \left(\frac{da_q}{dt} \right)^2 + \frac{I_m}{2} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 = m g a_{qz} - \sum_{i=1}^n N_i(w_i) dw_i, \quad (1)$$

где I_m — момент инерции массы.

В уравнении (1) два члена левой части представляют собой кинетическую энергию, выраженную через перемещение и угол поворота соответственно. Первый член правой части уравнения выражает высвобождающуюся потенциальную энергию, а последний — поглощенную энергию деформации для связевого пластического соединения. Деформированное состояние, при котором наступает равновесие, достигается тогда, когда движение системы полностью прекращается.

В этом состоянии кинетическая энергия системы становится равной $W_k = 0$. Достигается максимальное вертикальное перемещение $a_{qz, \max}$ в центре тяжести модифицированной (поврежденной) части конструктивной системы. Таким образом, условие равновесия для деформированного состояния системы с одной степенью свободы на первом полупериоде колебаний можно записать традиционно:

$$Q a_{qz, \max} = \sum_{i=1}^n \int_0^{w_{i, \max}} N_i(w_i) dw_i, \quad (2)$$

где $a_{qz, \max}$ — максимальное вертикальное перемещение (вниз) от вынуждающей силы Q ; $w_{i, \max}$ — соответствующее перемещение (удлинение) i -ой горизонтальной (вертикальной) связи.

Энергия деформации связевого соединения(й) может быть выражена согласно Fib Bulletin 43 через относительную энергию деформационной способности связи:

$$\xi(w) = \frac{W(w)_{\text{int}}}{N_u w}, \quad (3)$$

где

$$W_{\text{int}}(w) = \int_0^w N(w) dw. \quad (4)$$

Следовательно, уравнение (2), выражающее энергетический баланс деформированной системы, можно записать:

$$Q a_{qz, \max} = \sum_{i=1}^n \xi_i(w_{i, \max}) N_{i, u} w_{i, \max}. \quad (5)$$

Когда движение прекращается, система, вероятно, не обязательно находится в состоянии равновесия, поэтому в дополнение к условию (5) должно быть выполнено следующее условие:

$$R_{\text{stat}}(a_{qz, \max}) \geq mg. \quad (6)$$

Если статическое сопротивление, определенное на максимальном перемещении, превышает вынуждающую силу, система начинает движение вверх, и равновесие в деформированном состоянии наступит через несколько циклов преимущественно упругих колебаний. Если условие (6) не выполняется, принятое значение $a_{qz, \max}$ не является корректным, поскольку до его достижения происходит разрыв связей. Это может иметь место в системах с несколькими взаимодействующими связями, если связевые соединения последовательно разрушаются в процессе перемещения модифицированной системы (zipper type mode).

Проверку условий равновесия сил в деформированном состоянии для некоторого предлагаемого механизма обрушения выполняют с использованием уравнений (5) и (6). Тогда динамическое сопротивление R_{dyn} альтернативной системы может быть определено из условия, в соответствии с которым максимальная вынуждающая сила $Q = mg$ должна быть воспринята горизонтальными связями после внезапного удаления колонны.

Как следует из уравнения (5), динамическое сопротивление $R_{\text{dyn}}(a_{qz, \max})$ связано с максимальным вертикальным перемещением $a_{qz, \max}$, которое, как правило, выбирают с учетом наличия свободного пространства для перемещения системы (например, согласно Fib Bulletin 43 и BS 8110-1 расстояния до нижележащего перекрытия) и деформационной способности (пластической деформативности) соединения.

Предваряя вопросы, касающиеся количественной оценки неопределенностей предлагаемого упрощенного метода, основанного на положениях теории энергетического баланса, по сравнению с прямым нелинейным динамическим анализом, следует обратиться к работам [10, 11, 13], в частности, наиболее новой из них [20], опубликованной в 2021 г. В публикации [20] отмечено, что взамен громоздкого нелинейного динамического анализа (NLD), содержащего целый ряд неопределенностей (например, история нагружения, коэффициент демпфирования и т.д.), метод, основанный на энергетическом балансе (EBM), — перспективный и многообещающий метод определения максимальной динамической реакции конструктивной системы. Несмотря на некоторые погрешности, принятые при оценивании, которые следует рассмотреть отдельно, показано, что метод, основанный на энергетическом балансе, является достаточно точным и эффективным как при реализации изгибного механизма (образование пластических шарниров при малых деформациях); так и на стадии реализации мембранного (цепного) эффекта в связях, воспринимающих растяжение (стадия больших перемещений). В исследовании [20] показано, что модель, описывающая неопределенность (ошибку моделирования) метода энергетического баланса (EBM), по сравнению с нелинейным динамическим анализом (NLD) хорошо описывается логнормальным распре-

делением со следующими статистическими параметрами $LN(0,95; 0,20)$.

Сборное перекрытие

Статическое и динамическое сопротивление системы

Как было показано выше (см. уравнения (2)–(5)), сопротивление поврежденной системы с альтернативными путями передачи нагрузки практически напрямую зависит от способности к пластическому удлинению связей соединений при развитии больших перемещений.

Рассмотрим сборное перекрытие с равными пролетами плитных элементов. Внутренняя опора неразрезного ригеля разрушается при особых воздействиях. При удалении опоры сборное перекрытие вместе с системой связей должно сформировать альтернативную несущую систему, воспринимающую нагрузку над удаленным элементом при реализации цепного или мембранного эффектов. В соответствии со сформулированными допущениями (см. раздел «Допущения, принятые при разработке упрощенных аналитических моделей») в предельном состоянии сборные элементы перекрытий рассматриваются как абсолютно жесткие тела, соединенные податливыми связями.

Непосредственно после удаления средней опоры неразрезного ригеля сборные плиты начинают поворачиваться на соседних опорах и перемещаться вниз и, соответственно, по горизонтали.

Как следует из Fib Bulletin 43 [2], модель сопротивления записывают для выделенной продольной полосы, составленной из плит сборного перекрытия. При этом эффекты, возникающие в направлении, поперечном к выделенной полосе, требуют отдельного изучения и в данной упрощенной модели не учитываются. Рассматривается деформированное состояние системы после того, как арочный и балочный эффекты уже исчерпаны и не учитываются. Следует отметить, что в конструктивных системах со сборными плитами влияние названных эффектов может либо быть незначительным, либо отсутствовать полностью.

Примем, что связи во всех соединениях цепной системы одного и того же типа и обладают аналогичными характеристиками. Это означает, что связевые соединения имеют одинаковое сопротивление растяжению и одинаковую характеристическую зависимость $N-w$ для каждой связи. Для каждого элемента

перекрытия собственный вес и другие постоянные нагрузки представлены результирующим усилием Q , приложенным в его центре тяжести. Деформированное состояние определяется вертикальным перемещением a_{qz} (рис. 1).

Для одинаковых горизонтальных перемещений w трех связевых соединений вертикальное перемещение a_{qz} может быть рассчитано непосредственно из деформированной геометрической схемы как:

$$a_{qz} = \frac{\sqrt{3lw}}{2}, \quad (7)$$

где l — длина элемента сборного перекрытия.

Из условий статического равновесия системы в деформированном состоянии можно записать:

$$Q \frac{l}{2} = N(w)2a_{qz}. \quad (8)$$

С учетом выражения (7) статическое сопротивление:

$$R_{\max}(a_{qz,\max}) = 2N(w)\sqrt{\frac{3w}{l}}. \quad (9)$$

Формально, максимальное значение статического сопротивления связано с максимальным перемещением $a_{qz,\max}$, при котором движение системы вниз должно быть остановлено, определяется по формуле:

$$R_{\max}(a_{qz,\max}) = 2N_u \sqrt{\frac{3w_{\max}}{l}}. \quad (10)$$

Условия энергетического баланса для двухпролетной системы:

$$2Qa_{qz,\max} = 3\xi(w_{\max})N_u w_{\max}. \quad (11)$$

Вводя выражения (7) и (10) в уравнение (11), получаем:

$$R_{\text{dyn}}(a_{qz,\max}) = \frac{1}{2}\xi(w_{\max})R_{\max}. \quad (12)$$

Из уравнений (10) и (12) очевидно, что динамическое сопротивление цепной системы зависит не только от сопротивления связей растяжению, но и их пластической деформативности, т.е. способности к удлинению. В уравнении (12) использован коэффициент 1/2. Это объясняется тем, что даже, если связевое соединение будет иметь идеально пластическую реакцию, статическое сопротивление

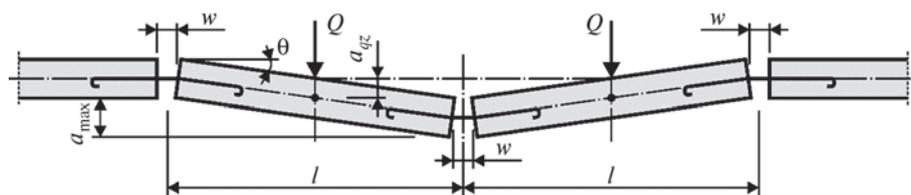


Рис. 1. Геометрическая схема сборного перекрытия для определения цепного эффекта при больших перемещениях
Fig. 1. Geometric scheme of a prefabricated floor for calculating the catenary effect at large displacements

цепной системы возрастает практически линейно с возрастанием перемещения [2].

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЯЗЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Моделирование связей, работающих на растяжение

Диаграмма $N-w$ для арматурного стержня

Для получения диаграммы $N-w$, связывающей продольное растягивающее усилие N с перемещением w (локальным смещением) связи, работающей на растяжение, следует иметь диаграмму $\tau-s$, описывающую закон сцепления по контакту с окружающим бетоном (рис. 2). На основании обширных экспериментальных исследований Fib Bulletin 72⁶, включая и собственные исследования для описания закона

⁶ Fib Bulletin 72. Bond and anchorage of embedded reinforcement: Background to the fib Model Code for Concrete Structures 2010 // Technical report federation internationale du beton. 2014.

сцепления по контакту, была принята зависимость, включенная в СП 5.03.01-2020.

Преимуществом диаграммы, показанной на рис. 2, является то, что она применима как для стержней периодического профиля, так и гладких стержней, а также практически полного параметрического ряда бетонов, включая высокопрочные (СП 5.03.01-2020, Fib MC 2010, Fib Bulletin 72). Значения касательных напряжений τ и смещений s_i в параметрических точках диаграммы следует принимать согласно СП 5.03.01-2020.

Для перехода к зависимости $N-w$ необходимо:

- а) определить длину зоны передачи напряжений l_t ;
- б) распределение деформаций $\epsilon_s(x)$ и $\epsilon_{ct}(x)$ на этой длине (рис. 3).

В общем случае длина зоны передачи напряжений возрастает с увеличением растягивающего усилия. Для отдельного стержня, заделанного в бетоне, возможны следующие случаи: 1) длина зоны передачи напряжений меньше или равна длине анкеровки; 2) длина зоны передачи напряжений больше

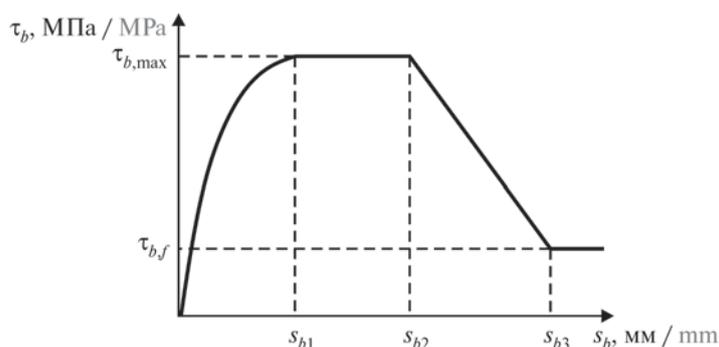


Рис. 2. Диаграмма $\tau-s$ для контактной поверхности арматурного стержня с окружающим бетоном согласно СП 5.03.01-2020

Fig. 2. Diagram $\tau-s$ for the contact surface of the reinforcing bar with the surrounding concrete according to SP 5.03.01-2020

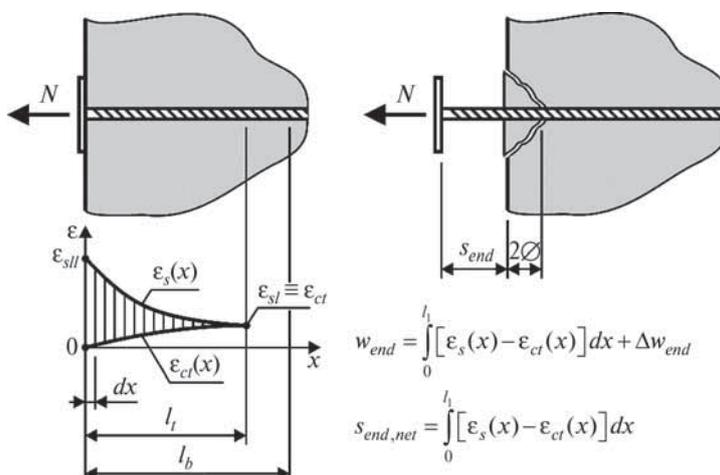


Рис. 3. К определению величины смещения конечного участка стержня

Fig. 3. To determine the value of the displacement of the end section of the bar

длины анкеровки. Следует отметить, что для непрерывных связей растяжения, проходящих через перекрытие, практически всегда справедлив случай 1.

Согласно СП 5.03.01-2020, Fib MC 2010 для условий, когда поперечные деформации бетона ограничены (ограниченные условия), а максимальные напряжения сцепления соответствуют величине локального смещения $s_{b1} = 1,0$ мм, для описания восходящей ветви диаграммы принимают зависимость:

$$\tau_b = \tau_{b,\max} s_b^{0,4}, \quad (13)$$

где $\tau_{b,\max}$ — максимальные напряжения сцепления согласно СП 5.03.01-2020; s_b — текущее значение смещения арматурного стержня в бетоне.

Для определения смещения в случае, когда длина анкеровки больше длины зоны передачи напряжений, принимается, что бетонный элемент является жестким телом по отношению к арматурному стержню. Это, безусловно, дает незначительную переоценку величины смещения торца арматурного стержня относительно бетона.

При условии упругой работы стержня и смещения его торца не более чем на 1 мм, справедлива следующая зависимость, полученная в Fib Bulletin 43, Fib Bulletin 72 при обосновании расчетных положений, внесенных в Fib MC 2010:

$$w_{end} = 0,288 \left(\frac{\sigma_s^2}{\tau_{b,\max} E_s} \right)^{0,714} + \frac{\sigma_s}{E_s} 2\varnothing, \quad (14)$$

где \varnothing — диаметр стержня, мм;

$$\tau_{b,\max} = 2,5\sqrt{f_{cd}} \quad (15)$$

для «хороших» условий сцепления;

$$\tau_{b,\max} = 1,25\sqrt{f_{cd}} \quad (16)$$

для «всех других» условий сцепления.

Первый член в правой части уравнения (14) соответствует смещению торца на длине зоны передачи напряжений и обозначается $s_{end,net}$:

$$s_{end,net} = 0,288 \left(\frac{\sigma_s^2}{\tau_{b,\max} E_s} \right)^{0,714}. \quad (17)$$

Последний член уравнения (14) учитывает эффект локального разрушения поверхности бетона у свободного края на длине примерно $2\varnothing$.

Обратное выражение, связывающее напряжения σ_s с определенным заданным смещением торца стержня, можно записать из формулы (17) следующим образом:

$$\sigma_s = 2,39 \sqrt{\frac{\tau_{b,\max} E_s}{\varnothing} s_{end,net}^{1,4}} \quad (18)$$

при
$$s_{end,net} = w_{end} - \frac{\sigma_s}{E_s} 2\varnothing. \quad (19)$$

Соответственно, длина зоны передачи напряжений, согласно Fib Bulletin 43, Fib Bulletin 72, будет равна:

$$l_t = 0,583 \frac{\varnothing \sigma_s}{\tau_{b,\max} s_{end,net}^{0,4}} + 2\varnothing. \quad (20)$$

Если смещение торца стержня не превышает 1 мм, то в соответствии с диаграммой τ - s (см. рис. 3), текучесть на нагруженном конце арматурного стержня достигается прежде, чем будет достигнуто $\tau_{b,\max}$. Смещение торца стержня при достижении текучести в арматурном стержне $w_{end,y}$ и длину передачи напряжений $l_{t,y}$ получают при подстановке в уравнение (18) и (20) напряжений, равных расчетному значению сопротивления арматуры $\sigma_s = f_{yd}$. Зависимость между растягивающим усилием и проскальзыванием стержня до достижения текучести в общем случае уже является нелинейной. Однако жесткость (или податливость) соединения $k_a(w_{end})$ определяется в общем случае как секущая в точке $N(w_{end})$:

$$k_a(w_{end}) = \frac{N(w_{end})}{w_{end}}. \quad (21)$$

Приблизительное значение жесткости соединения непосредственно перед достижением текучести определяют:

$$k_a = \frac{N_y}{w_{end,y}}, \quad (22)$$

где N_y — усилие, соответствующее текучести в связи; $w_{end,y}$ — смещение, соответствующее $\sigma_s = f_{yd}$.

Выражение (21) недооценивает жесткость для нагрузок, меньших, чем N_y . Для этого уровня нагружения более репрезентативной будет жесткость, рассчитанная с применением уравнения (22).

Предельная величина проскальзывания

Когда в стержне достигается текучесть и происходит локальное разрушение бетона (в виде конуса высотой $2\varnothing$) у поверхности элемента, часть длины зоны передачи напряжений получает пластическую деформацию. Однако для достижения текучести вдоль всего стержня напряжения в арматурной стали на его нагруженном конце должны превышать предел текучести. Согласно Fib Bulletin 43 для длины зоны передачи напряжений вводится так называемая длина «пластической» зоны передачи напряжений — участок, на длине которого заглубленный в бетон стержень достигает текучести. При этом в пределах «пластической» зоны напряжения сцепления по контакту снижаются согласно Fib Bulletin 72.

При достаточной анкеровке стержня в теле бетона максимальная длина пластического участка на длине зоны передачи напряжений будет определяться при достижении арматурной сталью прочности при разрыве f_u . Поэтому на длине «пластического» участка напряжения возрастают от значений,

соответствующих текучести f_y , до значений, соответствующих прочности арматуры при разрыве f_{ud} на свободном конце стержня (рис. 4).

Тогда предельная длина участка пластических деформаций может быть получена из условия равновесия (см. рис. 4):

$$l_{t,pl} = \frac{F_{su} - F_{sy}}{\tau_{bm,pl} \pi \varnothing} = \left(\frac{f_{ud} - f_{yd}}{\tau_{bm,pl}} \right) \frac{\varnothing}{4}, \quad (23)$$

где $\tau_{bm,pl}$ — средние значения напряжений сцепления по контакту на длине зоны пластического деформирования, определяемые по формуле (24).

Для деформативных стержней периодического профиля (арматура классов В и С согласно СП 5.03.01-2020) в Fib Bulletin 43, Fib Bulletin 72 предложено выявлять средние напряжения сцепления на длине зоны пластического деформирования при разрыве стержней из зависимости:

$$\tau_{bm,pl} = 0,27\tau_{b,max}, \quad (24)$$

где $\tau_{b,max}$ определяется по формулам (15) или (16) в зависимости от условий сцепления.

Предельное смещение (удлинение) связевого стержня рассчитывается по формуле:

$$w_{end,u} = l_{t,pl} \varepsilon_{sm,pl} + w_{end,y}, \quad (25)$$

где $\varepsilon_{sm,pl}$ — средние относительные деформации арматурного стержня на длине участка пластического деформирования, согласно Fib Bulletin 43, приняты равными $\varepsilon_{sm,pl} = 0,5\varepsilon_{su}$.

Как следует из уравнения (25), предельное перемещение возрастает по мере увеличения длины зоны пластического деформирования $l_{t,pl}$.

Для описания зависимости $N-w$ по результатам анализа результатов испытаний стержней, заглубленных в бетоне, а также с учетом рекомендаций Fib Bulletin 43, для моделирования работы связей была предложена трехлинейная идеализированная диаграмма, показанная на рис. 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пример проверки живучести сборного многоэтажного здания

Конструктивная система, исходные данные

В качестве примера рассмотрим конструктивную систему сборного каркаса 18-этажного здания, план которого показан на рис. 6. В данной конструктивной системе в качестве опорных вертикальных

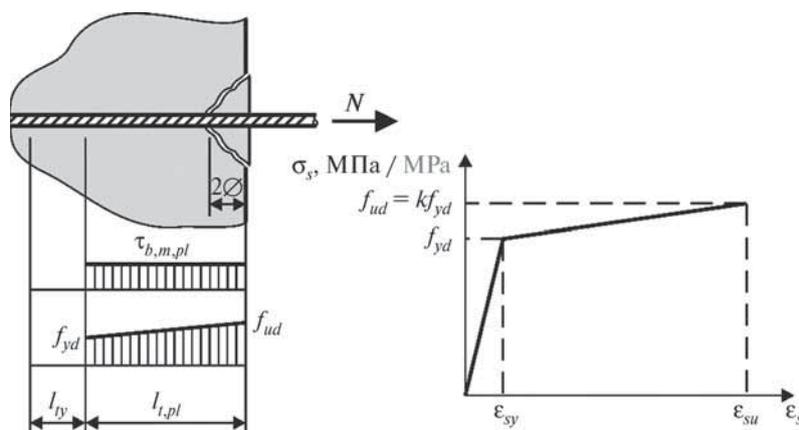


Рис. 4. К определению длины «пластического» участка (пластических деформаций)

Fig. 4. Determination of the length of the “plastic” region (plastic deformations)

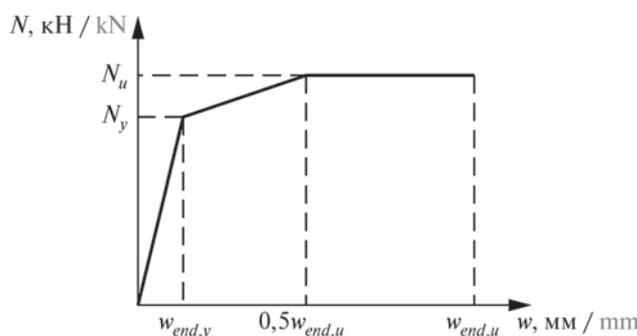


Рис. 5. Идеализированная диаграмма $N-w$ для связи из арматурной стали, работающей на растяжение, согласно Fib Bulletin 43 и Fib Bulletin 72

Fig. 5. An idealized $N-w$ diagram for a tensile reinforcing steel tie according to Fib Bulletin 43 and Fib Bulletin 72

элементов использованы монолитные колонны сечением 300×300 мм (по осям 2, 6) и сборные панельные стены (по осям 1, 4, 7). Перекрытие выполнено из сборных плит пустотного настила $1,2 \times 6,0$ м, высотой 0,22 м с подрезкой в опорных узлах, изготовленных по агрегатно-поточной технологии. Плиты опираются на полки сборных ригелей высотой 0,26 м (рис. 7). На стадии предварительного анализа запроектирована система горизонтальных и вертикальных

связей в соответствии с требованиями СП 5.03.01-2020 и ТКП EN1991-1-7.

В соответствии с исходными данными к проекту были приняты следующие характеристические значения воздействий: 1) собственный вес плит перекрытия $g_{k1} = 3,05$ кПа; 2) собственный вес конструкции пола $g_{k2} = 0,6$ кПа; 3) переменная нагрузка $q_k = 1,5$ кПа. Особое сочетание воздействий принято в виде:

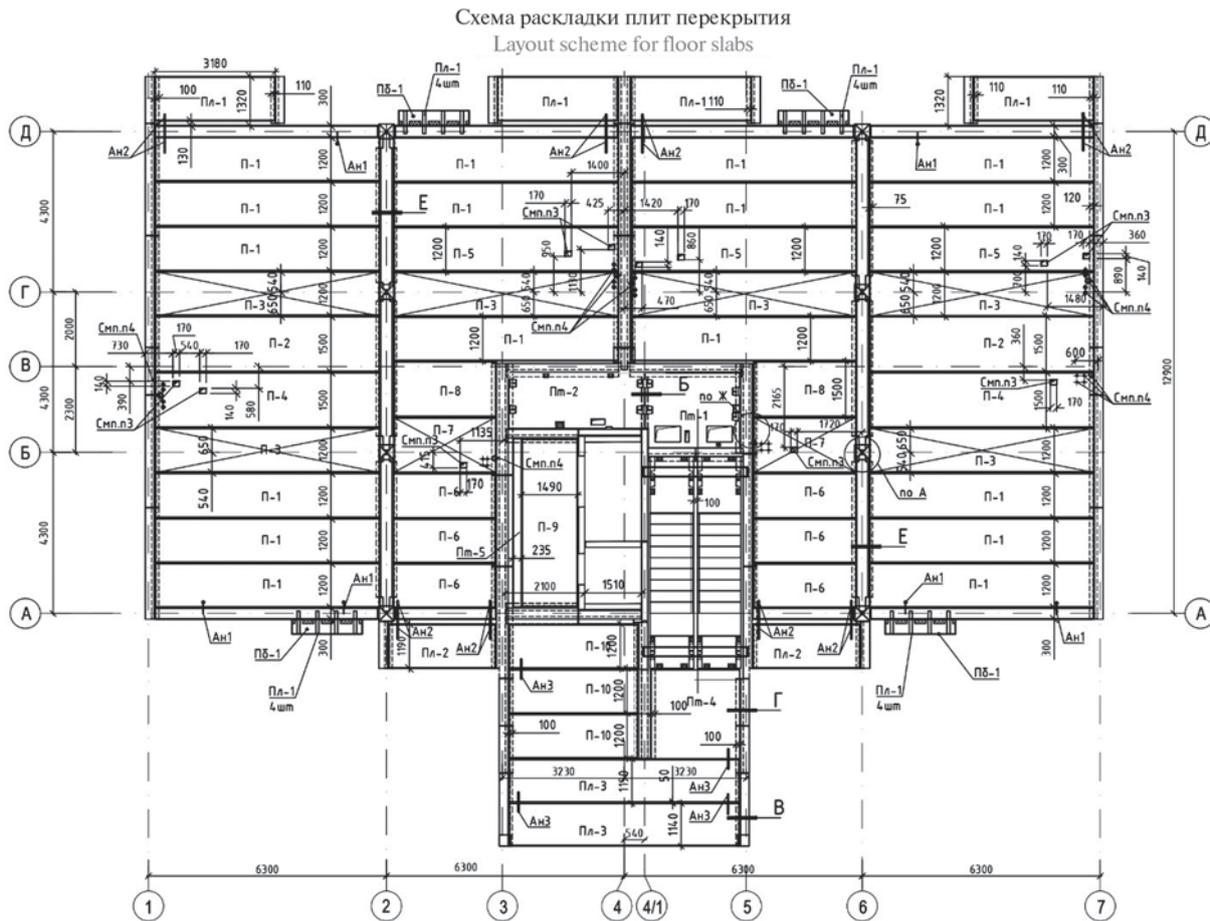


Рис. 6. План перекрытия первого этажа 18-этажного сборного каркасного здания

Fig. 6. Plan of the first floor of an 18-storey prefabricated frame building

Бетон С16/20
мелкозернистый
Fine-grained C16/20
concrete

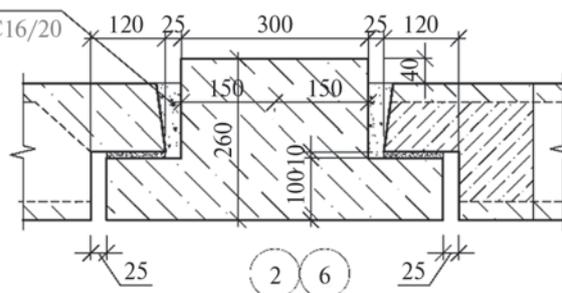


Рис. 7. Узел опирания плит пустотного настила на ригель

Fig. 7. Supporting joint for slabs on the girder

$$P_A = g_{k1} + g_{k2} + \Psi_2 \cdot q_k = 3,05 + 0,6 + 0,3 \cdot 1,5 = 4,1 \text{ кПа.}$$

Проверку живучести конструктивной системы выполняли с использованием полученных аналитических зависимостей, учитывающих цепной (мембранный) эффект в конструкциях сборного каркаса.

В рамках подходов, сформулированных в действующих нормах и указаниях (СП 5.03.01-2020; СН 2.01.01-2019; ТКП EN1991-1-7; BS 8110-1; DoD 2005 UFC 4-023-03), рассматривают отдельно сопротивление полосы из плит перекрытия в одном направлении и сопротивление сборных ригелей в другом. В отличие от известных решений при определении требуемых площадей сечений горизонтальных связей, размещаемых в ригелях и плитах пустотного настила, используется принцип совместности вертикальных перемещений в удаленном узле. В соответствии с данным принципом (принцип совместности) деформационно-силовые параметры связей в ригелях и плитах определяют из условия равенства перемещений: $a_{\max,p} = a_{\max,b}$ (здесь, $a_{\max,p}$ и $a_{\max,b}$ — максимальный прогиб плит и ригелей в месте удаленного элемента, соответственно).

Моделирование связевых элементов

Принимаем в качестве связей, обладающих значительной пластической деформативностью, стержни $\varnothing 28S240$ со следующими характеристиками: $f_{yk} = 240$ МПа; $(f_u/f_y)_k = 1,3$; $E_s = 200$ ГПа; $\epsilon_{suk} = 1,5 \cdot 10^{-2}$; $A_s = 616$ мм². Бетон C20/25: $f_{ck} = 20$ МПа; $f_{cm} = 20 + 8 = 28$ МПа. Результаты вычисления параметрических точек диаграмм $N-w$ (рис. 5) для принятых горизонтальных связей представлены в табл. 1.

Аналитическое решение

Рассмотрим полосу ригелей по оси 2 (рис. 6). Считаем, что внутренние связи по направлению оси 2 сосредоточены в сборных ригелях. Ригели нагружены особой нагрузкой: $Q = 4,1 \times 6,0 \times 4,0 = 98,4$ кН. На опоре ригели имеют петлевые выпуски $2\varnothing 25S500$ и дополнительно зарезервированные горизонтальные связи $4\varnothing 28S240$. Перемещение среднего узла (в месте удаления колонны) не должно превышать 2,3 мм (свободное пространство этажа).

Определение основных расчетных параметров и результаты проверки живучести представлены в табл. 2.

Опираясь на принятое условие равенства деформаций, покажем, как определить требуемую площадь сечения связей для данного вида арматуры (S240).

Принимаем: $a_{\max,pl} = 0,61$ м; $R_{dyn} = 29,52$ кН = Q ; $\xi(w_{\max}) = 0,97$; $w_{\max,pl} = 0,0206$ мм.

$$R_{\max} = \frac{2R_{dyn}}{\xi(w_{\max})} = \frac{2 \cdot 29,52}{0,97} = 60,86 \text{ кН.}$$

Тогда требуемое усилие, соответствующее разрыву стержня:

$$N_u = \frac{R_{\max}}{2 \sqrt{\frac{3w_{\max}}{6,0}}} = \frac{60,86}{2 \sqrt{\frac{3 \cdot 0,0206}{6,0}}} = 299,8 \text{ кН.}$$

Так как $2\varnothing 28S240 N_u = 384 \text{ кН} > 299,8 \text{ кН}$. Требуемая площадь арматурных стержней:

$$A_{s,req} = \frac{N_u}{1,3f_{yk}} = \frac{299,8 \cdot 10^3}{1,3 \cdot 240} = 960,9 \text{ мм}^2.$$

Принимаем $2\varnothing 25S240 (A_s = 982 \text{ мм}^2)$.

Сравнение результатов расчетов требуемых параметров связей, полученных по методу энергетического баланса и по действующим нормативным документам

Выполним сравнение результатов, полученных с применением аналитических моделей, основанных на уравнениях энергетического баланса деформированной системы при максимальном вертикальном перемещении, с моделями, включенными в нормативные документы и рекомендации различных стран (СП 5.03.01-2020; ТКП EN1991-1-7; BS 81101; DoD 2005 UFC 4-023-03; РКЗ 2002⁷) для расчета вертикальных и горизонтальных связей, полученных главным образом только из условий равновесия при заданной величине прогиба. Результаты подбора площади сечения горизонтальных связей по требованиям действующих норм приведены в табл. 3.

⁷ Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях. М. : Москомархитектура, 2002.

Табл. 1. Параметрические точки диаграмм $N-w$ для принятых горизонтальных связей из стержней $\varnothing 28S240$

Table 1. Parametric points of $N-w$ diagrams for taken horizontal ties from bars $\varnothing 28S240$

Номер No.	Армирование Reinforcement	Параметры диаграммы $N-w$ Parameters for $N-w$ diagram			
		N_y , кН / kN	N_u , кН / kN	$w_{end,y}$, мм / mm	$w_{end,u}$, мм / mm
1	$2\varnothing 28S240$	295,68	384,38	0,658	28,94
2	$4\varnothing 28S240$	591,40	768,76	0,658	28,94

Примечание: общий вид диаграммы $N-w$, см. рис. 5.

Note: general view of the $N-w$ diagram, see Fig. 5.

Табл. 2. Проверка живучести сборного железобетонного здания

Table 2. Robustness check of precast concrete building

Ригель $l = 4,3$ м Girder $l = 4,3$ m					Плиты пустотного настила $l = 6,3$ м Hollow slab $l = 6,3$ m				
Порядок вычисления Evaluation order	Параметр Parameter	Обоснование Justification	Значение Value	Единица измерения Units	Порядок вычисления Evaluation order	Параметр Parameter	Обоснование Justification	Значение Value	Единица измерения Units
1	w_{\max}	Табл. 1 Table 1	0,02894	м	6	$a_{\max,s} = a_{\max,b}$	См. примечание ¹ See note ¹	0,61	м / м
2	$a_{\max,b} = 2 a_{qz,\max}$	Формула (7) Formula (7)	0,61	м	7	w_{\max}	Формула (7) Formula (7)	0,0206 ²	м / м
3	R_{\max}	Формула (10) Formula (10)	218,47	кН	8	R_{\max}	Формула (10) Formula (10)	77,94	кН / кН
4	R_{dyn}	Формула (12) Formula (12)	218,47	кН	9	R_{dyn}	Формула (12) Formula (12)	37,80	кН / кН
5	$R_{dyn} > Q$	Формула (6) Formula (6)	105,8 > 98,4		10	$R_{dyn} > Q$	Формула (6) Formula (6)	37,8 > 29,52	

Примечание: ¹ — принимая условие равенства прогибов $a_{\max,s} = a_{\max,b}$, определяем требуемое удлинение горизонтальной связи в плитах перекрытия (в поперечном направлении) w_{\max} ; ² — из табл. 1 для 2Ø28S240: $0,5w_u = 14,47$ мм < $w_{\max,req} = 20,6$ мм < $w_u = 28,94$ мм.

Note: ¹ — accepting the compatibility hypothesis $a_{\max,s} = a_{\max,b}$, we determine the required elongation of the horizontal tie in the hollow slabs (in the transverse direction) w_{\max} ; ² — from Table 1 for 2Ø28S240: $0,5w_u = 14,47$ мм < $w_{\max,req} = 20,6$ мм < $w_u = 28,94$ мм.

Табл. 3. Результаты подбора горизонтальных связей по действующим нормативным документам

Table 3. The results of calculating horizontal ties according to the current standards

Номер No.	Источник Reference	Формула Equation	Связевое усилие, T_j Tie Force, T_j		a_{\max} ² м m	δ_s	Армирование A_s , мм ² Reinforcement A_s , мм ²
			кН kN	кН/м kN/m			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	EN1991-1-7	$0,8(g_k^1 + q_k)sL$	75	62,5	1,3	$\leq \frac{l_s}{4,8}$	$\frac{1\text{Ø}20\text{S}240}{(314)}$
2	BS 8110-1 EN1991-1-7 DoD	$\frac{(g_k + q_k)}{7,5} \cdot \frac{l_r}{5} \cdot F_t$ $F_t = 20 + 4n_s$ или 60 кН/м	62,69	51,91	1,97	$\leq \frac{l_s}{3,2}$	$\frac{1\text{Ø}20\text{S}240}{(314)}$
3	DoD СП 5.03.01	$3(1,2g_k + 0,5q_k)l_b$ $3(g_k + 0,3q_k)l_b$	116,34	96,57	1,05	$\leq \frac{l_s}{6}$	$\frac{1\text{Ø}25\text{S}240}{(491)}$
4	PK3 2002	$(g_k + q_k)l_b / 2$	19,47	16,22	5,25	$\leq \frac{l_s}{1,2}$	$\frac{1\text{Ø}12\text{S}240}{(113)}$

Примечание: ¹ — в расчете принято $l_b = 6,3$ м; $g_k = 3,65$ кПа; $q_k = 1,5$ кПа;

² — максимальный прогиб a_{\max} определен из уравнения $a_{\max} = \delta_s = (g_k + q_k)l_b^2 / (2T_j)$.

Note: ¹ — the calculation is based on $l_b = 6,3$ м; $g_k = 3,65$ кПа; $q_k = 1,5$ кПа;

² — the maximum deflection a_{\max} is determined from the equation $a_{\max} = \delta_s = (g_k + q_k)l_b^2 / (2T_j)$.

Анализ нормативных документов и рекомендаций (СП 5.03.01-2020; ТКП EN1991-1-7; BS 8110-1; DoD 2005 UFC 4023-03; РКЗ 2002) показывает, что все расчетные модели, представленные в табл. 3, имеют в своей основе базовые уравнения для определения цепного (мембранного) усилия, полученного из условий статического равновесия деформированной системы при максимальном вертикальном перемещении:

$$T_j = (1 + \alpha) \frac{(g_k + \psi_i q_k) l_b^2}{2 \delta_s}, \quad (26)$$

где δ_s — вертикальное перемещение сечения с удаленным опорным элементом.

В работе [2] показано, что расчетная модель BS8110-1 и EN1991-1-7 опирается на формулу для определения вертикального перемещения:

$$\delta_s = 18,75(1 + \alpha) \frac{l_b}{T_j}. \quad (27)$$

При определении α от 0 до 1,5 (согласно [2]) и F_t от 24 до 60 кН/м (при изменении числа этажей от 1 до 10 и более) получаем максимальное перемещение $a_{\max} = \delta_s \leq l_b/1,28(!)$. Расчетная модель DoD 2005 UFC 4-023-03 получена при $a_{\max} = \delta_s \leq l_b/6$.

Основываясь на результатах испытаний полномасштабных перекрытий, выполненных в 1985–1999 гг. в PCA [2], установлено, что предельное перемещение, при котором реализуется цепной (мембранный) эффект, составляет $\delta_s = l_b/6,67$, что близко к значениям, принятым в DoD 2005 UFC 4-023-03 и полученным другими исследователями. Кроме того, в работах [2, 12, 20] показано, что форма разрушения, связанная с разрывом стержней, достигается при $\delta_s \leq l_b/10$.

Сравнение результатов расчетов, полученных с применением уравнений энергетического баланса и зависимостей из норм (СП 5.03.01-2020; СН 2.01.01-2019; ТКП EN1991-1-7; BS 8110-1; DoD 2005 UFC 4-023-03; РКЗ 2002) (см. табл. 3), демонстрирует, что требуемые площади арматурных стержней, применяемых в качестве горизонтальных связей, суще-

ственно отличаются. Так, при расчете по нормам (СП 5.03.01-2020; СН 2.01.01-2019; ТКП EN1991-1-7; BS 8110-1) требуется 1Ø20S240, по нормам DoD 2005 UFC 4-023-03 1Ø25S240, а в соответствии с рекомендациями МНИИТЭП и НИЦ СтаДиО (РКЗ 2002) требуется 1Ø12S240 (см. табл. 3), тогда как из расчета по уравнениям энергетического баланса с использованием зависимостей $N-w$ — 2Ø25S240.

Применение фиксированных значений максимальных вертикальных перемещений (от $l_b/1,28$ до $l_b/10$) в нормах и рекомендациях (СП 5.03.01-2020; СН 2.01.01-2019; ТКП EN1991-1-7; BS 8110-1; DoD 2005 UFC 4-023-03; РКЗ, 2002) приводит к довольно оптимистичным результатам при выборе горизонтальных связей. Кроме того, зависимости перечисленных норм получены без учета динамических эффектов.

Для сравнения выполнен расчет параметрических точек диаграмм $N-w$ для связей, рассчитанных по нормам (СП 5.03.01-2020; СН 2.01.01-2019; ТКП EN1991-1-7; BS 8110-1; РКЗ, 2002) (см. табл. 4), и проверены критерии живучести перекрытия с использованием сопротивлений R_{\max} , R_{dyn} , полученных из уравнений энергетического баланса. Результаты расчетов приведены в табл. 5.

Как видно из результатов расчета, представленных в табл. 5, проверочный критерий $R_{dyn} \geq Q$ для горизонтальных связей, установленных по нормам (СП 5.03.01-2020; ТКП EN1991-1-7; BS 8110-1; DoD 2005 UFC 4-023-03; РКЗ 2002), не выполняется. При этом принятое армирование, несмотря на заведомо заложенную значительную пластическую деформативность связей из арматуры S240 ($\epsilon_{suk} = 1,5 \cdot 10^{-2}$), не обеспечивает достижения принятого а priori вертикального перемещения без разрыва стержней, исключая тем самым условие плавного выключения системы. Так, вертикальный прогиб $a_{\max} = 0,73$ м для арматуры 1Ø20S240, определенный с учетом предельного усилия стали по методу энергетического баланса, оказывается недостаточным для восприятия особых воздействий. Усилия в связях, определенные по нормам, соответствуют a_{\max} от 1,05 м до 1,968 м, что для данной арматуры реалистичным не является.

Табл. 4. Параметрические точки диаграмм $N-w$ для горизонтальных связей, рассчитанных согласно Fib Bulletin 43
Table 4. Parametric points of $N-w$ diagrams for taken horizontal ties calculated according to Fib Bulletin 43

Номер No.	Армирование Reinforcement	Параметры диаграммы $N-w$ Parameters for diagram $N-w$			
		N_y , кН N_y , kN	N_w , кН N_w , kN	$w_{end,y}$, мм $w_{end,y}$, mm	$w_{end,w}$, мм $w_{end,w}$, mm
1	1Ø25S240	117,84	153,19	0,492	38,49
2	1Ø20S240	75,4	97,97	0,612	30,8
3	1Ø12S240	27,14	35,29	0,379	18,9

Примечание: общий вид диаграммы $N-w$ см. рис. 5.
 Note: general view of the $N-w$ diagram see Fig. 5.

Табл. 5. Расчетные значения сопротивлений R_{\max} , R_{dyn} для поврежденной системы
Table 5. Design values of resistances R_{\max} , R_{dyn} for the damaged system

Номер No.	Источник Reference	Требуемое армирование Required reinforcement	Сопротивление связей, кН Resistance of ties, kN		Максимальное перемещение a_{\max} , м Maximum displacement a_{\max} , m		Критерий $R_{\text{dyn}} \geq Q$ Criterion $R_{\text{dyn}} \geq Q$
			R_{\max}	R_{dyn}	По нормам ¹ According to the standards ¹	По энергетическому балансу ² According to the energy balance ²	
1	EN1991-1-7	1Ø20S240	23,73	11,03	1,3	0,73	Не выполняется Not done
2	BS 8110-1 EN1991-1-7 DoD				1,968	0,73	Не выполняется Not done
3	DoD СП5.03.01	1Ø25S240	41,63	19,44	1,05	0,85	Не выполняется Not done
4	PK3 2002	1Ø12S240	6,70	3,25	5,25	0,59	Не выполняется Not done
5	Согласно энергетическому балансу According to the energy balance	2Ø25S240	60,87	29,52	—	0,61	Выполняется Done

Примечание: ¹ — вертикальные перемещения, соответствующие усилию, определенному по действующим нормам; ² — вертикальные перемещения из уравнений энергетического баланса.

Note: ¹ — vertical displacements corresponding to the force determined by the current standards; ² — vertical displacements from the energy balance equations.

Как следует из зависимости (22), полученной из условия равновесия деформированной системы, при постоянном значении усилия в связи $T_j = f_{yd} A_{st}$ (после достижения деформаций, соответствующих текучести стали) несущая способность конструктивной системы линейно зависит от величины вертикального перемещения δ_s . После преобразования зависимости (22), учитывая, что $(g_k + \psi_i q_k) = R_{\max}$, получаем:

$$R_{\max} = \frac{2f_{yd} A_{st}}{l_b^2} \delta_s. \quad (28)$$

Так, для рассмотренного случая горизонтальной связи 1Ø25 S240 при $l_b = 6300$ мм, $A_{st} = 491$ мм².

$$R_{\max} = 0,0059\delta_{s,\max}. \quad (29)$$

Как было показано ранее, одним из основных вопросов при расчете связевых усилий является определение положения точки, показывающей прогиб, при котором мобилизуется мембранный (цепной эффект). Для установления этой точки при работе статически неопределимой конструкции с определенной долей упрощения может быть предложен следующий подход: в качестве точки, определяющей величину прогиба, при котором начинает реализовываться цепной (мембранный) эффект, следует считать точку a_0 перемещения диаграммы F - δ , полученной при ини-

циации (включении) изгибного пластического шарнира с прямой описывающей зависимостью F - δ для цепного (мембранного) эффекта, как это показано на рис. 8.

Следует иметь в виду, что горизонтальная связь, установленная в конструкции, является либо ненагруженной до момента включения в работу (когда проектируется как независимая связь), либо имеет напряжения сжатия (когда она — часть армирования, попадающего в сжатую зону сечения при изгибе). Следовательно, количество армирования горизонтальной связи следует подбирать таким образом, чтобы с одной стороны был обеспечен цепной (мембранный) эффект для восприятия особого сочетания воздействий, а с другой — обеспечен плавный переход от выключающегося изгибного шарнира к включающейся связи растяжения. Установленное количество и пластические свойства изгибной арматуры при принятых параметрах сечения должны обеспечить достаточную длину ветви пластического деформирования для достижения прогиба a_0 . Значит, процедура проектирования конструкции при проверках живучести должна базироваться на обеспечении плавного и согласованного перехода к мобилизации альтернативных путей передачи нагрузки (усилий).

Максимальное перемещение a_{\max} и сопротивление R_{\max} следует определять, опираясь на уравнения энергетического баланса, как это было показано ра-

нее. Для обеспечения совместности в работе изгибных шарниров и горизонтальных связей растяжения в статически неопределимых системах предложена следующая процедура:

1) выполняют нелинейный расчет модифицированной конструктивной системы и определяют предельную точку диаграммы $F-\delta$ для условий работы только изгибного шарнира (рис. 9, *a*). Через эту точку проходит линейная зависимость $F-\delta$, описывающая с допустимым приближением работу горизонтальной связи. Тангенс угла наклона устанавливает жесткость горизонтальной связи;

2) рассчитывают параметры горизонтальной связи для обеспечения требуемого сопротивления при восприятии комбинации особых воздействий. При этом для заданного R_{max} определяют деформационные параметры связи, обеспечивающие достижение требуемого максимального перемещения a_{max} (рис. 9, *b*);

3) производят комплексный расчет модифицированной конструктивной системы с изгибными шарнирами и шарнирами растяжения с использованием вычислительного комплекса, в котором реализованы нелинейные процедуры;

4) осуществляют построение динамической диаграммы и определяют несущую способность поврежденной конструктивной системы (рис. 9, *c*) при установленном значении глобального коэффициента безопасности согласно, например, работе [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы. Предложенный метод определения мембранных (цепных) усилий, основанный на положениях энергетического баланса поврежденной конструктивной системы (ЕВМ), — перспективный и многообещающий метод вычисления ее максимальной динамической реакции. Данный метод определения полной динамической реакции системы может успешно применяться как в случае простых аналитических моделей, так и для сложных нелинейных конечно-элементных моделей взамен громоздкого нелинейного динамического анализа (NLD), содержащего целый ряд неопределенностей (например, история нагружения, коэффициент демпфирования, ошибка моделирования и т.д.).

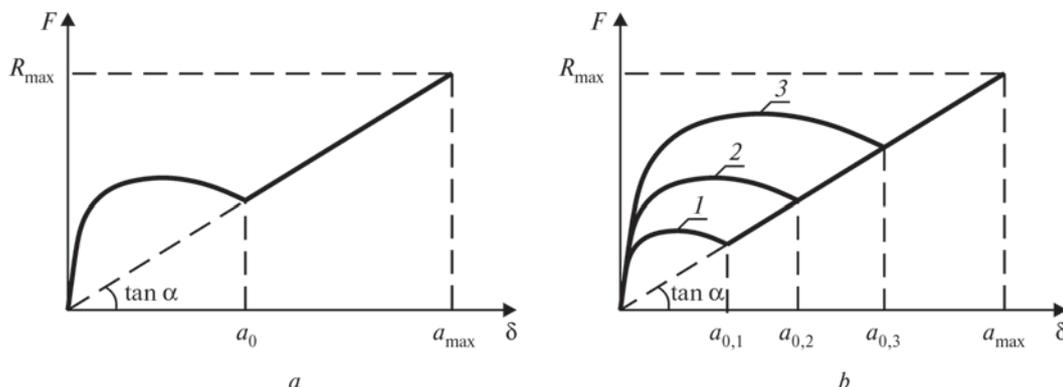


Рис. 8. К определению положения точки a_0

Fig. 8. To determine the position of point a_0

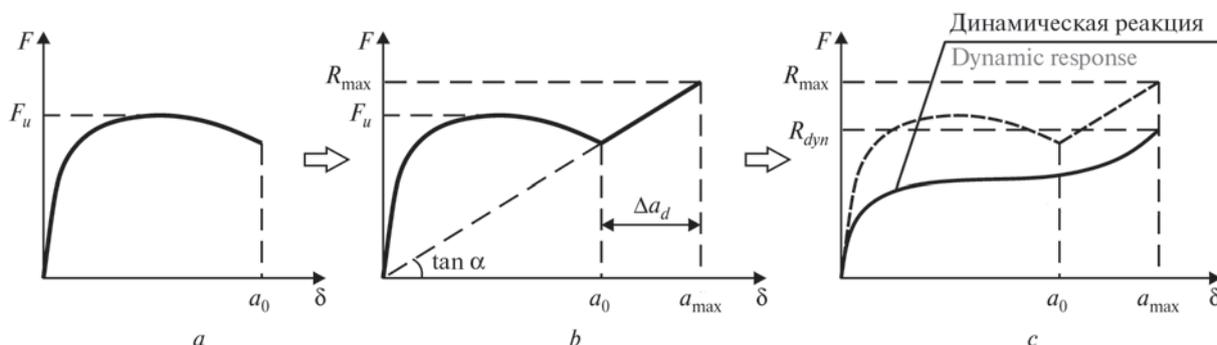


Рис. 9. К определению параметров совместности системы связей: *a* — зависимость $F-\delta$ при реализации изгибного пластического шарнира; *b* — комплексная зависимость $F-\delta$ для изгибного шарнира и горизонтальной связи; *c* — построение динамической реакции системы

Fig. 9. To the determination of the parameters of a compatible system of ties: *a* — the dependence $F-\delta$ when realizing a flexural plastic hinge; *b* — complex dependence $F-\delta$ for the flexural joint and horizontal connection; *c* — determination of the dynamic response of the system

Сравнение результатов расчета, полученных с применением положений действующих норм и рекомендаций (СП 5.03.01-2020; СН 2.01.01-2019; ТКП EN1991-1-7; BS 8110-1; DoD 2005 UFC 4-023-03; РКЗ 2002) и предложенных зависимостей, основанных на модели энергетического баланса системы, показало, что расчетные модели норм в ряде случаев могут давать небезопасный результат, занижая, например, требуемую площадь сечения горизонтальных связей. Это объясняется тем, что все зависимости для расчета связевых усилий опираются на постоянные значения предельного прогиба (как правило, от 1/6 до 1/10 пролета) без проверок предельной деформативности горизонтальных связей. Как следует из выполненного анализа, при неизменном значении особого сочетания воздействий расчетное усилие в связи (на которое производят подбор ее сечения) изменится обратно пропорционально прогибу. Принятый в нормах и рекомендациях (СП 5.03.01-2020; СН 2.01.01-2019; ТКП EN1991-1-7; BS 8110-1; DoD 2005 UFC 4-023-03; РКЗ 2002) подход может приво-

дить к нереалистичным результатам, когда принятое армирование горизонтальной связи не может обеспечить достижения заложенного а priori предельного прогиба в силу недостаточной деформативности. В наибольшей мере совпадает с решениями, основанными на применении энергетического баланса, модель, включенная в DoD 2005 UFC 4-023-03, в которой при выводе расчетных уравнений использован постоянный предельный прогиб 1/10 пролета. Следует внести изменения в действующие нормы (СП 5.03.01-2020; СН 2.01.01-2019; ТКП EN1991-1-7) в части применения для проектирования горизонтальных связей методов, основанных на энергетическом балансе системы.

Учитывая ряд допущений, принятых при формулировании базовых положений метода, основанного на энергетическом подходе, следует выполнить статистический анализ ошибки моделирования, опираясь на результаты экспериментальных исследований, а не результаты динамических расчетов конечно-элементной модели, как это сделано в работе [20].

ЛИТЕРАТУРА

1. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 173. Pp. 122–149. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.082
2. Tohidi M. Effect of floor-to-floor joint design on the robustness of precast concrete cross wall buildings. University of Birmingham, 2015. 400 p.
3. Перельмутер А.В. О расчетах сооружений на прогрессирующее обрушение // *Вестник МГСУ*. 2008. № 1. С. 119–128.
4. El-Tawil S., Li H., Kunnath S. Computational simulation of gravity-induced progressive collapse of steel-frame buildings: Current trends and future research needs // *Journal of Structural Engineering*. 2014. Vol. 140. Issue 8. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000897
5. Byfield M., Mudalige W., Morison C., Stoddart E. A review of progressive collapse research and regulations // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Structures and Buildings*. 2014. Vol. 167. Issue 8. Pp. 447–456. DOI: 10.1680/stbu.12.00023
6. Fang Z.X., Fan H.T. Redundancy of structural systems in the context of structural safety // *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 14. Pp. 2172–2178. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.07.273
7. Folić R. Structural Robustness of monolithic and precast RC building // *First Scientific-applied Conference with International Participation Reinforced Concrete and Masonry Structures-Theory and Practice*. Sofia, 2015.
8. Травуш В., Колчунов В.И., Ключева Н.В. Некоторые направления развития теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений // Про-

- мышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 4–11.
9. Qian K., Li B. Research advances in design of structures to resist progressive collapse // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2015. Vol. 29. Issue 5. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000698
10. Tur A., Tur V. Reliability Approaches to Modeling of the Nonlinear Pseudo-Static Response of RC-structural Systems in Accidental Design Situations // *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. 2018. Vol. 22. Issue 1. DOI: 10.5755/j01.sace.22.1.20194
11. Herraiz B., Vogel T., Russell J. Energy-based method for sudden column failure scenarios: Theoretical, numerical and experimental analysis // *IABSE Workshop Helsinki 2015: Safety, Robustness and Condition Assessment of Structures*. Report. International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE. 2015. Pp. 70–77. DOI: 10.3929/ethz-a-010389549
12. Izzuddin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss — Part I: Simplified assessment framework // *Engineering Structures*. 2008. Vol. 30. Issue 5. Pp. 1308–1318. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.07.011
13. Vlassis A.G., Izzuddin B.A., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss — Part II: Application // *Engineering Structures*. 2008. Vol. 30. Issue 5. Pp. 1424–1438. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.08.011

14. Кучерявенко Д.Н. К вопросу о защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. С. 453–456.

15. Джумагулова Ж.С., Стамалиев А.К. Оценка несущей способности конструкций многоэтажных зданий при прогрессирующем обрушении // Вестник КГУСТА. 2013. № 1. С. 49–51.

16. Де Бьяджи В. Повышение живучести сооружений с помощью усложнения конструктивных схем // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 4 (51). С. 92–100.

17. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Чесноков Д.А. Защита многоэтажных зданий от прогрессирующего

обрушения // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 6. С. 8–13.

18. Tur V., Tur A., Lizahub A., Derechennik S. Accidental actions values and combinations for key-elements checking // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 212. P. 02019. DOI: 10.1051/e3sconf/202021202019

19. Van Coile R., Hopkin D., Elhami Khorasani N., Lange D., Gernay T. Permanent and live load model for probabilistic structural fire analysis: a review // 3rd International Conference on Structural Safety under Fire and Blast Loading, Brunel University, London, 2019, 2nd – 4th September. 2019.

20. Ding L., Van Coile R., Botte W., Caspeele R. Quantification of model uncertainties of the energy-based method for dynamic column removal scenarios // Engineering Structures. 2021. Vol. 237. P. 112057. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112057

Поступила в редакцию 29 мая 2021 г.

Принята в доработанном виде 26 августа 2021 г.

Одобрена для публикации 26 августа 2021 г.

О Б АВТОРАХ: **Виктор Владимирович Тур** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов, заслуженный работник образования Республики Беларусь; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**; Республика Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267; РИНЦ ID: 941222, Scopus: 6507476083, ORCID: 0000-0001-6046-1974; profurvic@gmail.com;

Андрей Викторович Тур — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**; Республика Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267; РИНЦ ID: 948695, Scopus: 57208898378, ORCID: 0000-0002-9744-9044; aturphd@gmail.com;

Александр Александрович Лизогуб — магистр технических наук, аспирант кафедры строительных конструкций; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**; Республика Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267; ORCID: 0000-0002-8896-0246; p_332_14lizogub@mail.ru.

REFERENCES

1. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*. 2018; 173:122-149. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.082

2. Tohidi M. *Effect of floor-to-floor joint design on the robustness of precast concrete cross wall buildings*. University of Birmingham, 2015; 400.

3. Perel'muter A.V. About calculations of structures for progressive collapse. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2008; 1:119-128. (rus.)

4. El-Tawil S., Li H., Kunnath S. Computational simulation of gravity-induced progressive collapse of steel-frame buildings: Current trends and future research needs. *Journal of Structural Engineering*. 2014; 140(8). DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000897

5. Byfield M., Mudalige W., Morison C., Stoddart E. A review of progressive collapse research and regulations. *Proceedings of the Institution of Civil En-*

gineers — Structures and Buildings. 2014; 167(8):447-456. DOI: 10.1680/stbu.12.00023

6. Fang Z.X., Fan H.T. Redundancy of structural systems in the context of structural safety. *Procedia Engineering*. 2011; 14:2172-2178. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.07.273

7. Folić R. Structural Robustness of monolithic and precast RC building. *First Scientific-applied Conference with International Participation Reinforced Concrete and Masonry Structures-Theory and Practice*. Sofia, 2015.

8. Travush V.I., Kolchunov V.I., Klyueva N.V. Some directions of development of survivability theory of structural systems of buildings and structures. *Industrial And Civil Engineering*. 2015; 3:4-11. (rus.)

9. Qian K., Li B. Research advances in design of structures to resist progressive collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2015; 29(5). DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000698

10. Tur A., Tur V. Reliability Approaches to Modeling of the Nonlinear Pseudo-Static Response of RC-structural Systems in Accidental Design Situations. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. 2018; 22(1). DOI: 10.5755/j01.sace.22.1.20194
11. Herraiz B., Vogel T., Russell J. Energy-based method for sudden column failure scenarios: Theoretical, numerical and experimental analysis. *IABSE Workshop Helsinki 2015: Safety, Robustness and Condition Assessment of Structures. Report. International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE*. 2015; 70-77. DOI: 10.3929/ethz-a-010389549
12. Izzuddin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss — Part I: Simplified assessment framework. *Engineering Structures*. 2008; 30(5):1308-1318. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.07.011
13. Vlassis A.G., Izzuddin B.A., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss — Part II: Application. *Engineering Structures*. 2008; 30(5):1424-1438. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.08.011
14. Kucheryavenko D.N. On the issue of protecting high-rise buildings from progressive collapse. *International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2014; 453-456. (rus.).
15. Dzhumagulova Zh.S., Stamaliev A.K. Assessment of the bearing capacity of structures of multi-storey buildings with progressive collapse. *Proceedings of the Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov*. 2013; 1:49-51. (rus.).
16. De Biagi V. Increasing the robustness of structures by increasing the complexity of structural schemes. *Journal of Construction and Architecture*. 2015; 4:92-100. (rus.).
17. Kodysh E.N., Trekin N.N., Chesnokov D.A. Protection of multistory buildings from progressing collapse. *Industrial And Civil Engineering*. 2016; 6:8-13. (rus.).
18. Tur V., Tur A., Lizahub A., Derechennik S. Accidental actions values and combinations for key-elements checking. *E3S Web of Conferences*. 2020; 212:02019. DOI: 10.1051/e3sconf/202021202019
19. Van Coile R., Hopkin D., Elhami Khorasani N., Lange D., Gernay T. Permanent and live load model for probabilistic structural fire analysis: a review. *3rd International Conference on Structural Safety under Fire and Blast Loading*, Brunel University, London, 2019, 2nd – 4th September. 2019.
20. Ding L., Van Coile R., Botte W., Caspeele R. Quantification of model uncertainties of the energy-based method for dynamic column removal scenarios. *Engineering Structures*. 2021; 237:112057. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112057

Received May 29, 2021.

Adopted in revised form on August 26, 2021.

Approved for publication on August 26, 2021.

BIONOTES: **Viktor V. Tur** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Concrete and Building Materials Technology, Honored Worker of Education of the Republic of Belarus; **Brest State Technical University (BrSTU)**; 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Republic of Belarus; ID RISC: 941222, Scopus: 6507476083, ORCID: 0000-0001-6046-1974; profurvic@gmail.com;

Andrei V. Tur — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Structures; **Brest State Technical University (BrSTU)**; 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Republic of Belarus; ID RISC: 948695, Scopus: 57208898378, ORCID: 0000-0002-9744-9044; aturphd@gmail.com;

Aliaksandr A. Lizahub — master of Engineering Science, postgraduate student of the Department of Building Structures; **Brest State Technical University (BrSTU)**; 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Republic of Belarus; ORCID: 0000-0002-8896-0246; p_332_14lizogub@mail.ru.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 628.511

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1034-1044

Исследование характеристик восходящего вихря циклона и концентрации пыли по его сечению

А.В. Лукьянов, С.М. Орлов, Б.Р. Романенко

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДонНАСА); г. Макеевка,
Донецкая Народная Республика*

АННОТАЦИЯ

Введение. Защита атмосферы — социальная и экономическая проблема, неразрывно связанная с задачей создания комфортных условий для жизни и работы человека. Циклоны являются наиболее характерными представителями сухих инерционных пылеуловителей. Изучение аэродинамических характеристик восходящего вихря позволит более полно использовать энергию, затраченную на закрутку потока, и тем самым повысить эффективность циклонов, а также снизить энергозатраты на очистку газа от пыли. Цель исследования — снижение энергозатрат при очистке газа циклонами.

Материалы и методы. Применены аналитический и экспериментальный методы исследования.

Результаты. Получены аналитические зависимости аэродинамики восходящего вихря циклона, которые показали, что восходящий вихрь имеет сложную структуру, и циклон представляет собой искусственно созданную спиральную структуру, сродни такому природному явлению, как торнадо. Данная математическая модель получила полное подтверждение проведенными экспериментальными исследованиями.

Выводы. Показали, что восходящий вихрь в циклоне имеет структуру, состоящую из двух зон. В первой зоне (ядро) сила радиального градиента давления превышает центробежную силу, и пыль устремляется к оси циклона. Во второй центробежная сила превышает силу градиента давления, и пыль отбрасывается на периферию. Приведенная теоретическая модель позволит обоснованно выбирать методы более рационального использования затраченной энергии и повышения эффективности циклонов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: циклон, выхлопная труба, пыль, восходящий вихрь, центробежная сила, сила радиального градиента давления, угловая частота, скорость радиального дрейфа

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лукьянов А.В., Орлов С.М., Романенко Б.Р. Исследование характеристик восходящего вихря циклона и концентрации пыли по его сечению // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 8. С. 1034–1044. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1034-1044

Study of the characteristics of the ascending vortex of the cyclone and the concentration of dust along its section

Alexander V. Lukyanov, Stanislav M. Orlov, Boris R. Romanenko

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA); Makeevka,
Donetsk People's Republic*

ABSTRACT

Introduction. Protection of the atmosphere is a social and economic problem inextricably linked with the task of creating comfortable conditions for human life and work. Cyclones are the most typical representatives of dry inertial dust collectors. This work is aimed at reducing energy consumption when cleaning gas with cyclones.

Materials and methods. In the course of the work, analytical and experimental research methods were applied.

Results. Analytical dependences of the aerodynamics of the ascending cyclone vortex have been obtained, which showed that the ascending vortex has a complex structure and the cyclone is an artificially created spiral structure, akin to such a natural phenomenon as a tornado. The obtained mathematical model was fully confirmed by experimental studies.

Conclusions. The studies carried out show that the ascending vortex in the cyclone has a structure consisting of two zones. In the first zone (core), the force of the radial pressure gradient exceeds the centrifugal force, and the dust rushes towards the cyclone axis. In the second, the centrifugal force exceeds the force of the pressure gradient, and the dust is thrown to the periphery. The obtained theoretical model will make it possible to reasonably choose methods for more rational use of the expended energy and increasing the efficiency of cyclones.

KEYWORDS: cyclone, exhaust pipe, dust, upward vortex, centrifugal force, radial pressure gradient force, angular frequency, radial drift velocity

FOR CITATION: Lukyanov A.V., Orlov S.M., Romanenko B.R. Study of the characteristics of the ascending vortex of the cyclone and the concentration of dust along its section. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(8):1034-1044. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1034-1044 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Общий объем выбросов загрязняющих веществ в 2019 г. составил (по данным Росприроднадзора) 22 734 тыс. т. Выбросы от стационарных источников возросли по сравнению с показателями 2018 г. (17 068 тыс. т) и зафиксированы на отметке 17 295 тыс. т¹.

Защита атмосферы — социальная и экономическая проблема, неразрывно связанная с задачей создания комфортных условий для жизни и работы человека.

Большинство технологических процессов в промышленности сопровождаются пылегазовыми выбросами, содержащими ценные полупродукты, которые безвозвратно теряются. Поэтому очистка и обезвреживание промышленных выбросов имеют санитарное и экономическое значение [1, 2].

Циклоны являются наиболее характерными представителями сухих инерционных пылеуловителей, которые, как правило, имеют простую конструкцию, обладают большой пропускной способностью и несложны в эксплуатации. Ввиду этих преимуществ циклоны получили широкое распространение [3–6].

В настоящее время имеется большое количество исследований по повышению эффективности циклонов, а также создано значительное количество видов циклонов, однако добиться, чтобы циклоны использовались как самостоятельный аппарат очистки газа от пыли, не удалось. Основное направление исследований сосредоточено на повышении сепарационных свойств нисходящего вихревого потока, в то время как пыль из циклона выносятся восходящим потоком, который практически не изучен.

Восходящий вихрь, по данным ученых, вращается как твердое тело, вместе с тем нет единого мнения даже о радиусе восходящего вихря. У Барта [7] радиус восходящего вихря равен радиусу выхлопной трубы $R_{\text{вых}}$, по Тер-Линдену — $2/3 R_{\text{вых}}$ [8], по Стройману — $1/2 R_{\text{вых}}$ [9]. Изучение аэродинамических характеристик восходящего вихря позволит более полно использовать энергию, затраченную на закрутку потока, и тем самым повысить эффективность циклонов, а также снизить энергозатраты на очистку газа от пыли [10, 11].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Чаще всего радиус восходящего вихря равен радиусу выхлопной трубы. Данная гипотеза была проверена авторами экспериментально и нашла подтверждение.

Наиболее целесообразно все аэродинамические зависимости восходящего вихря приводить к кон-

структивным и эксплуатационным параметрам циклона. Так, угловая скорость восходящего вихря равна [12]:

$$\omega = \frac{2V_{\text{вх}}(1-K_2)}{DK_2^2 \ln \frac{1}{K_2}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{вх}}$ — скорость во входном патрубке, м/с; K_2 — отношение диаметра выхлопной трубы к диаметру циклона; D — диаметр циклона, м.

Под действием вращения восходящего вихря циклона возникает центробежная сила [12]:

$$F_{\text{ц}} = \frac{\pi \rho_{\text{г}} d_{\text{ч}}^3 \omega^2 DK_2 n}{3}, \quad (2)$$

где n — доля радиуса выхлопной трубы циклона $0 < n \leq 1$.

За счет вращения статическое давление в радиальном направлении распределяется неравномерно [7]. Восходящий вихрь в циклоне представляет собой вихревой цилиндр. Если в области циркуляционного течения распределение давления для несжимающейся жидкости определяется уравнением Бернулли, то в вихревой области распределение давления устанавливается из условия равновесия вращающихся частиц [13]. Распределение статического давления по радиусу восходящего вихря описывается выражением [12]:

$$p^* = -\frac{\rho_{\text{г}} V_{\text{вх}}^2 (1-K_2)^2}{2K_2^2 \left(\ln \frac{1}{K_2} \right)^2} (1-n^2), \quad (3)$$

где $\rho_{\text{г}}$ — плотность газа, кг/м³.

Под действием радиального градиента давления газ движется с ускорением, которое будет равно [12]:

$$a_{\text{ц}} = \frac{V_{\text{вх}}^2 (1-K_2)^2}{DK_2^3 \left(\ln \frac{1}{K_2} \right)^2}. \quad (4)$$

Частицы пыли увлекаются газовым потоком и движутся вместе с ним равномерно ускоренно, но отставая на время релаксации τ . Тогда скорость частицы в радиальном направлении относительно потока, при отсутствии других воздействий, равна [14]:

$$V_{\text{д}} = V_{\text{г}} - V_{\text{ч}} = a_{\text{ц}} t - a_{\text{ц}}(t - \tau) = a_{\text{ц}} \tau, \quad (5)$$

где τ — время релаксации частицы, с.

При нахождении частицы пыли в потоке, движущемся с ускорением, на частицу будет действовать сила, вынуждающая ее двигаться с ускорением. Увлекающая сила потока газа [15]:

$$F_{\text{с}} = 0,5 C_{\text{ч}} S_{\text{ч}} \rho_{\text{г}} V_{\text{д}}^2, \quad (6)$$

¹ О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году: государственный доклад. М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2020. 1848 с.

где $S_{\text{ч}}$ — эффективная площадь частицы пыли, для шара $S_{\text{ч}} = \pi d_{\text{ч}}^2/4, \text{ м}^2$.

В данном случае коэффициент сопротивления частицы $C_{\text{ч}}$ газовому потоку определяется законом Стокса [14, 16]:

$$C_{\text{ч}} = \frac{24}{Re}. \quad (7)$$

Силу сопротивления движению частицы относительно потока можно рассчитать с помощью формулы Стокса [17]:

$$F_{\text{с}} = 3\pi\mu_{\text{г}}d_{\text{ч}}V_{\text{др}}, \quad (8)$$

где $\mu_{\text{г}}$ — динамическая вязкость газа, Н·с/м².

Баланс сил, действующих на частицу в выхлопной трубе циклона, равен [14]:

$$F_{\text{с}} = (F_{\text{ц}} - F_{\text{р}}). \quad (9)$$

Подставив в формулу (9) значения и решив относительно скорости дрейфа $V_{\text{др}}$, получим:

$$V_{\text{др}} = \frac{d_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{г}} V_{\text{вх}}^2 (1 - K_2)^2}{18\mu_{\text{г}} DK_2^3 \left(\ln \frac{1}{K_2} \right)^2} (2n - 1). \quad (10)$$

Данная зависимость справедлива для циклонов любой конструкции, поскольку из конструктивных параметров циклонов в формуле (10) присутствуют только диаметр циклона D и отношение внутреннего диаметра выхлопной трубы к диаметру циклона K_2 , что имеется у циклонов любой конструкции.

На рис. 1 приведена зависимость дрейфа частиц в радиальном направлении в зависимости от доли радиуса выхлопной трубы $V_{\text{др}} = f(n)$.

Как видно из формулы (10) и графиков (рис. 1), при $n = 0,5$, т.е. при $R = 0,5R_{\text{вых}}$, разница между скоростями газа и частицами пыли равна нулю $V_{\text{др}} = 0$. Это говорит о том, что в зоне $R = 0,5R_{\text{вых}}$ есть область, в которой действие сил на частицу равно нулю. При этом $F_{\text{с}}$ так же обращается в ноль $F_{\text{с}} = 0$. Это возможно, когда $F_{\text{ц}} - F_{\text{р}} = 0$, т.е., когда центробежная сила равна силе воздействия газа на частицу пыли под действием градиента давления $F_{\text{ц}} = F_{\text{р}}$. Решив это равенство относительно R , получим:

$$R = \frac{m_{\text{ч}} a_{\text{р}}}{m_{\text{ч}} \omega^2} = 0,25DK_2 = 0,5R_{\text{вых}}. \quad (11)$$

Эксперименты и практика показывают, что установка отклоняющих вставок по оси циклона значительно увеличивает эффективность работы циклонов, что подтверждает правильность полученной зависимости (10). Причем заметим, что расположение зон в восходящем вихре циклона не зависит от параметров пыли и циклона (10) и (11), а граница раздела зон лежит в области $R = 0,25DK_2 = 0,5R_{\text{вых}}$.

Следовательно, можно сделать вывод, что циклон — это не что иное, как искусственно созданная спиральная структура, сродни такому явлению, как смерч (торнадо) [18]. Данное положение наглядно иллюстрируют фотографии смерча, показанные на рис. 2.

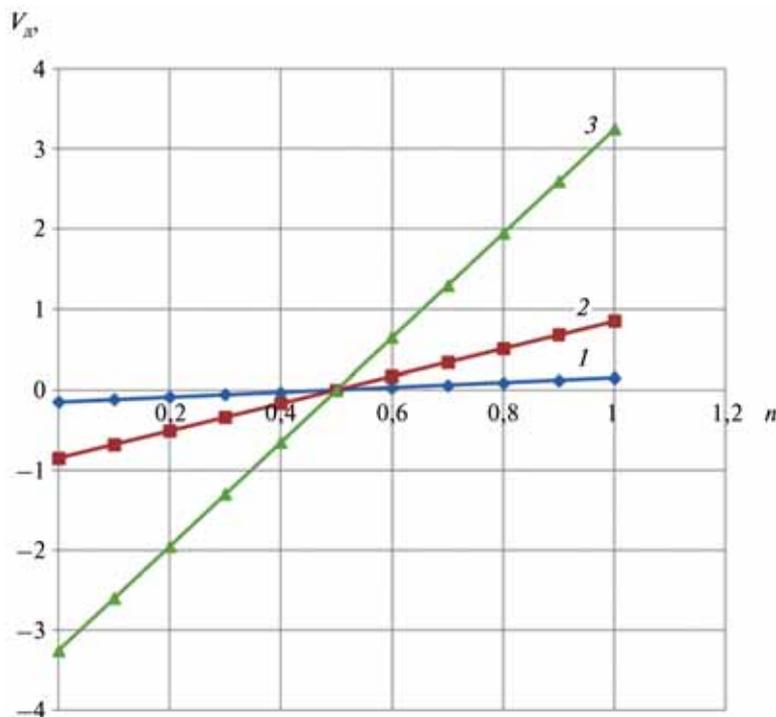


Рис. 1. Зависимости $V_{\text{др}} = f(n)$ циклон ЦН 11-300: $V_{\text{вх}} = 20 \text{ м/с}$; 1 — $d_{\text{ч}} = 2 \text{ мкм}$; 2 — $d_{\text{ч}} = 5 \text{ мкм}$; 3 — $d_{\text{ч}} = 10 \text{ мкм}$

Fig. 1. Dependencies $V_{\text{др}} = f(n)$ cyclone TsN 11-300: $V_{\text{in}} = 20 \text{ м/с}$; 1 — $d_{\text{h}} = 2 \text{ мкм}$; 2 — $d_{\text{h}} = 5 \text{ мкм}$; 3 — $d_{\text{h}} = 10 \text{ мкм}$

На рис. 2, *a* видно, что на периферии линии тока представляют собой логарифмические спирали, как и в циклоне (1). На рис. 2, *b* показано основание смерча, где четко просматривается центральная часть смерча, которая вращается по закону твердого тела, причем приосевая часть (хобот) равняется половине центральной области.

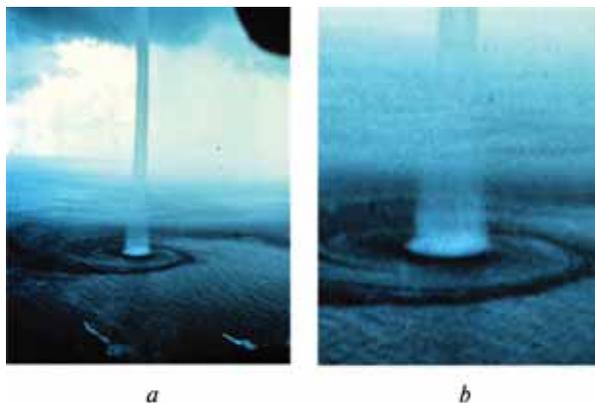


Рис. 2. Фотографии смерча: *a* — центральная часть смерча; *b* — основание смерча

Fig. 2. Photos of the tornado: *a* — the central part of the tornado; *b* — the base of the tornado

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения экспериментальных исследований особенностей гидродинамических процессов, протекающих в восходящем вихре циклона, был создан комплекс из двух экспериментальных установок. Измерение параметров проводилось согласно методике [19].

Для каждого исследования разрабатывалась своя программа, производилась оценка погрешности измерений, для уменьшения (минимизации) числа опытов применялись методы матричного планирования экспериментов.

На первой установке проанализированы соответствия принятым допущениям:

- радиус восходящего вихря, вращающегося как твердое тело, равен радиусу выхлопной трубы;
- конфигурация восходящего вихря;
- угловая скорость восходящего вихря;
- распределение статического давления по радиусу выхлопной трубы.

На второй установке проверялись концентрация пыли по сечению выхлопной трубы на выходе и изменение концентрации пыли по сечению выхлопной трубы в зависимости от емкости приемного бункера.

Экспериментальные исследования осуществлялись в лаборатории вентиляции и очистки воздуха Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 3.

Описание экспериментальной установки и методики проведения экспериментов

Опыты проводились на циклонах, изготовленных согласно конструктивным размерам НИИОГАЗ². Экспериментальная установка состоит из:

- циклона ЦН 11-300;
- транзисторного ключа, частота срабатывания которого задается генератором звуковой частоты ГЗ-33;
- светодиодной подсветки, установленной в пылевыпускном отверстии;
- прозрачных окон, расположенных по оси циклона;
- измерительной трубки Пито для измерения статического давления по радиусу выхлопной трубы;
- микроманометров типа НТ-1890;
- регулировочного шибера для установки расхода воздуха, проходящего через циклон;
- пневмометрической трубки Пито для измерения статического и полного давления;
- для создания необходимого разряжения в системе использовался вентилятор Ц 10-28 № 3,5;
- устройства для внесения шарика из пенопласта в нужную точку;
- устройства для определения частоты вращения восходящего вихря.

Приборы и методика определения точности измеряемых величин

При проведении экспериментальных исследований непосредственному измерению подлежали следующие параметры: скорость газа во входном патрубке; объемный расход воздуха; температура окружающей среды; барометрическое давление; относительная влажность воздуха; время проведения опыта; вес загружаемой пыли в дозатор; вес чистого и запыленного фильтров; вес пыли в бункере.

Скорость во входном патрубке определялась при помощи пневмометрической трубки Пито, погрешность измерений при которой не превышает 1–2 %.

Динамическую составляющую напора воздушного потока и гидравлическое сопротивление аппарата измеряли цифровым микроманометром типа НТ-1890 с точностью $\pm 0,3$ %.

Температура в помещении измерялась термометром лабораторным ТЛ-18 ГОСТ 20345-71 с точностью $\pm 0,5$ °С.

Барометрическое давление определялось с использованием барометра-анероида типа БАММ-1 ГОСТ Р 8.840-2013. Погрешность прибора ± 65 Па.

Относительная влажность воздуха устанавливалась аспирационным психрометром МВ-4М ГОСТ 112-78-52. Погрешность прибора 5 %.

Количество повторений эксперимента *m* выбирали таким образом, чтобы обеспечить доверитель-

²Циклоны НИИОГАЗ: руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации. Ярославль, 1970. 94 с.

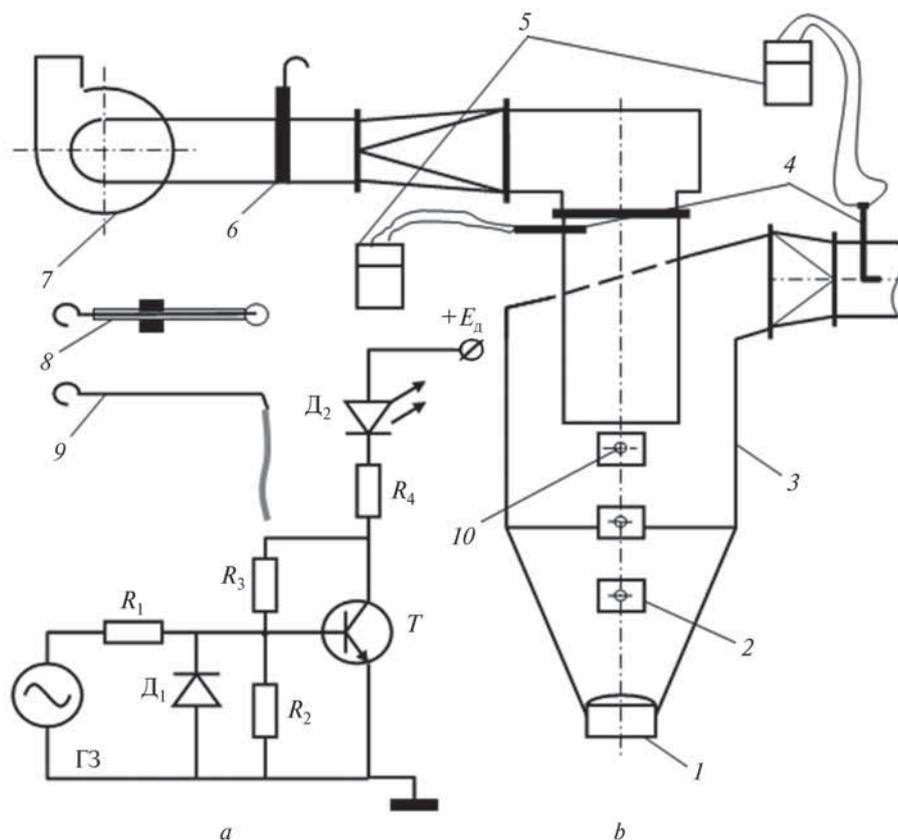


Рис. 3. Схема управления импульсной подсветкой (а) и схема первой экспериментальной установки (б): 1 — импульсная светодиодная подсветка; 2 — окна; 3 — циклон; 4 — трубки Пито; 5 — микроманометры; 6 — регулировочный шибер; 7 — вентилятор; 8 — зонд для внесения шарика из пенопласта в нужную точку; 9 — зонд для определения радиуса твердого тела, частоты вращения восходящего вихря и конфигурации струй; 10 — отверстия для внесения мерительных инструментов

Fig. 3. Pulse illumination control circuit (a) and circuit of the first experimental setup (b): 1 — pulsed LED illumination; 2 — windows; 3 — cyclone; 4 — Pitot tubes; 5 — micromanometers; 6 — adjusting gate; 7 — fan; 8 — a probe for introducing a foam ball to the desired point; 9 — probe for determining the radius of a solid, the frequency of rotation of the ascending vortex and the configuration of the jets; 10 — holes for inserting measuring instruments

ную вероятность проводимых испытаний 95 %. Для выявления достоверной вероятности воспользуемся формулой Корнфельда [20, 21]:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^m 100 \%, \quad (12)$$

где α — достоверная вероятность; m — число испытаний. Достоверная вероятность должна быть не менее 95 %.

Радиус и частота восходящего вихря определялись одновременно при помощи зонда 9 (рис. 2). Конструкция зонда представляет собой стальную проволоку диаметром $d_{щ} = 1,0$ мм, изогнутую на конце под углом 90° . На изогнутом конце зонда крепилась хорошо видимая лента, имеющая большую парусность и малый вес (елочный дождь). Будучи внесенной в центр восходящего вихря, лента 2 вращалась с той же частотой, что и восходящий поток. Для выяснения радиуса твердого тела и частоты вра-

щения применялся стробоскопический метод определения частоты вращения.

Частота подсветки изменялась при помощи генератора ЗГ. При совпадении частот ленточка зонда, казалось, стоит на месте. Радиус восходящего вихря определялся по длине ленты. Лента в пределах твердого тела имела ровную конфигурацию. Та часть, которая выходила за границы твердого тела, изгибалась и вибрировала. Удобно было устанавливать границу ровного участка ленты, когда частота генератора в 8–10 раз выше частоты вращения вихревого потока. В этом случае наблюдалось 8–10 лепестков. При такой частоте ось вращения ленты зонда легче совместить с осью циклона и границу твердого тела значительно легче определить.

В циклоне ЦН 11-300 радиус выхлопной трубы равен $R_2 = 88,5$ мм. У нас получилось меньшее значение $R_r = 84,6$ мм. Отклонение составляет всего 4,4 %, что вполне допустимо. Отклонение в меньшую сторону, чем радиус выхлопной трубы, можно объ-

яснить тем, что на границе восходящий поток несколько размывался и вносил погрешность в измерения в меньшую сторону. Поэтому делаем вывод, что радиус твердого тела равен, как у Барта, $R_T = R_{\text{вмх}}$.

Отклонение угловой скорости вращения от расчетной не превышало 5,8 %, что является хорошей сходимостью расчетных и экспериментальных данных.

Для определения границы зон, из которых состоит восходящий вихрь, избран метод пробного тела. В качестве пробного тела выбран шарик из пенополистирола $d_{\text{ш}} = 4$ мм с малым весом и большой парусностью. Этот шарик вносился в нужную точку при помощи зонда δ (рис. 2). Зонд состоит из тонкой $d = 3$ мм трубочки, в трубочку вставлен штырь, на конце которого наколот пенопластовый шарик, глубина внесения шарика устанавливается ограничителем. Расстояние от ограничителя до центра шарика определяется при помощи штангенциркуля. Точность установки лежит в пределах $\pm 0,1$ мм. После внесения шарика в нужное место он освобождается. Результаты измерений показали, что граница раздела восходящего вихря циклона ярко выражена. Отклонения составляют менее 4 %.

Распределение статического давления по радиусу выхлопной трубы производилось на той же установке, что и прошлые эксперименты.

Из предыдущих теоретических и экспериментальных исследований известно, что восходящий вихрь вращается как твердое тело с постоянной угловой скоростью. Характер распределения статического давления по радиусу выхлопной трубы (3) зависит от доли радиуса выхлопной трубы $(1 - n^2)$. Абсолютные значения зависят от эксплуатационных параметров:

$$(\rho_{\Gamma} V_{\text{вх}}^2) \tag{13}$$

и конструктивных параметров циклона

$$\frac{(1 - K_2)^2}{2K_2^2 \left(\ln \frac{1}{K_2} \right)^2}. \tag{14}$$

Результаты теоретических и экспериментальных исследований представлены в табл. 1. Максимальное расхождение между теоретическими и экспериментальными исследованиями имеет хорошую сходимость. Максимальное отклонение составляет 8,6 %.

Исследование распределения пыли по сечению выхлопной трубы проводилось на второй экспериментальной установке. Определение концентрации пыли по сечению выхлопной трубы — трудновыполнимая классическим методом задача. В выхлопной трубе, помимо осевой скорости, имеется интенсивная тангенциальная скорость, что делает практически невозможным уравнивание скорости в потоке и в пылезаборной трубке. Также ввиду ограниченности в пространстве выхлопной трубы пылезаборная трубка будет вносить искажения в воздушный поток, что тоже не способствует повышению точности замеров.

Для выявления распределения пыли по сечению выхлопной трубы было предложено устройство (сепаратор) с разделением потока в выхлопной трубе на две составляющие при помощи кольцевой диафрагмы 2 (рис. 4).

Ввиду интенсивной тангенциальной скорости (тангенциальная скорость значительно превышает осевую) концентрация пыли по окружности выхлопной трубы распределяется равномерно. Поэтому количество пыли, попавшее по разные стороны разделительной диафрагмы, распределяется по окружности равномерно. Таким образом, изменяя диаметр диффузора 2, а также изменяя объем бункера при помощи вставок, определим распределение пыли по сечению выхлопной трубы при различных объе-

Табл. 1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований статического давления по радиусу выхлопной трубы

Table 1. Results of theoretical and experimental studies of static pressure along the radius of the exhaust pipe

n	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Теоретические исследования Theoretical research	-419	-415	-403	-382	-352	-315	-268	-214	-151	-80	0
Эксперимент Experiment	-410		-400		-330		-260		-130		-0
	-400		-390		-340		-250		-140		-10
	-420		-380		-350		-270		-150		-0
	-400		-410		-340		-250		-130		-0
	-410		-390		-330		-260		-140		-10
Среднее The average	-408		-394		-338		-258		-138		-4

мах бункера. Количество пыли, попавшей по разные стороны разделительной диафрагмы, устанавливается путем разницы веса фильтров 6, 7 (рис. 5) до и после проведения эксперимента. Определение распределения пыли по радиусу выхлопной трубы целесообразно свести к однофакторному эксперименту.

Количество повторных экспериментов определяем, как и ранее, по формуле (12).

Построим матрицу уровней варьирования фактора. За интервал варьирования примем зазор между выхлопной трубой и разделительной диафрагмой (рис. 4) $b^* = R_{\text{вых}} - R_{\text{диф}} = kR_{\text{вых}}$. Минимальное значение фактора равно $0,1R_{\text{вых}}$, максимальное — $0,9R_{\text{вых}}$. Результаты сводим в табл. 2.

Таким образом, путем изменения радиуса диафрагмы мы разбиваем сечение выхлопной трубы условно на секторы (рис. 6). В процессе проведения эксперимента нужно определить количество пыли, попавшей в каждый сектор. Установив диффузор с радиусом $0,9R_2$, определим количество пыли в секторе b_1^* , т.е. G_1 . Установив диффузор с радиусом $0,7R_2$, определим количество пыли в секторе $b_1^* + b_2^*$, т.е. $G_1 + G_2$, вычтем G_1 и получим значение количества пыли в секторе b_2^* . Значение веса в других секторах определяем аналогично. Сумма количества пыли во всех секторах является выходным из циклона количеством пыли:

$$G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 + G_6 = G_{\text{вых}}. \quad (15)$$

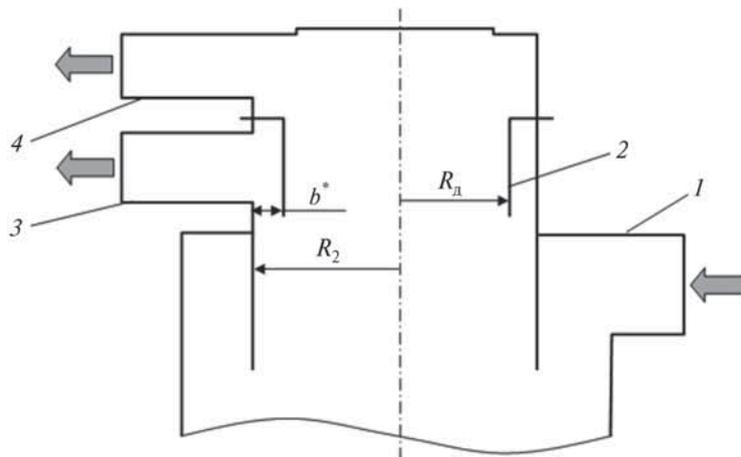


Рис. 4. Устройство для определения распределения пыли по сечению выхлопной трубы

Fig. 4. Device for determining the distribution of dust over the cross section of the exhaust pipe

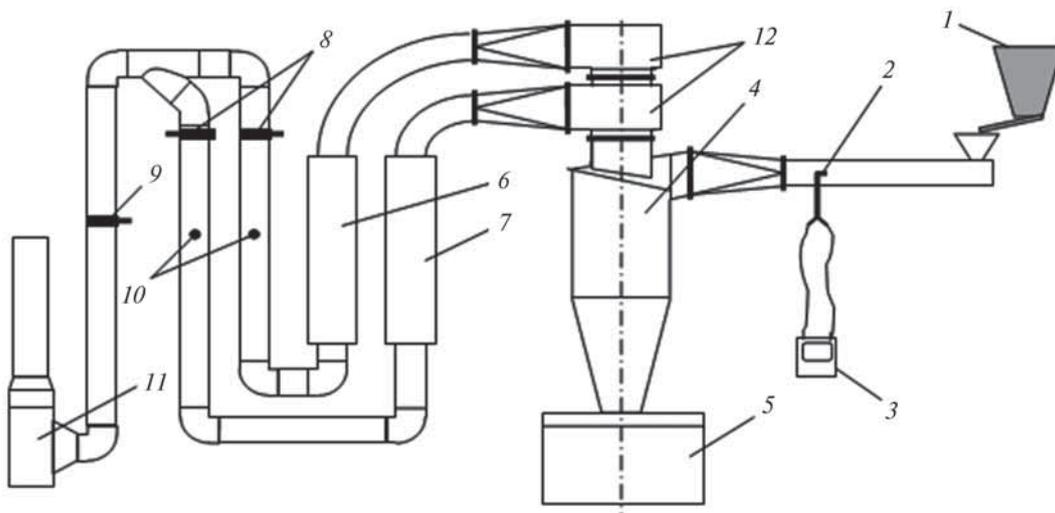


Рис. 5. Схема второй экспериментальной установки: 1 — питатель; 2 — трубка Пито; 3 — микроманометр; 4 — циклон; 5 — бункер; 6, 7 — фильтры; 8, 9 — шиберы; 10 — отверстия для измерения скоростей; 11 — вентилятор; 12 — концентратор пыли

Fig. 5. Scheme of the second experimental setup: 1 — feeder; 2 — pitot tube; 3 — micromanometer; 4 — cyclone; 5 — bunker; 6, 7 — filters; 8, 9 — gate; 10 — holes for measuring speeds; 11 — fan; 12 — dust concentrator

Табл. 2. Матрица уровней варьирования факторов

Table 2. Matrix of factor variation levels

Наименование / Name	Обозначение / Designation	Формула / Formula	Значение, мм / Value, mm
Интервал варьирования / Variation interval	h	$0,2R_2$	18
Минимальное значение / Minimum value	b_{\min}^*	$0,1R_2$	9
Максимальное значение / Maximum value	b_{\max}^*	$0,9R_2$	81

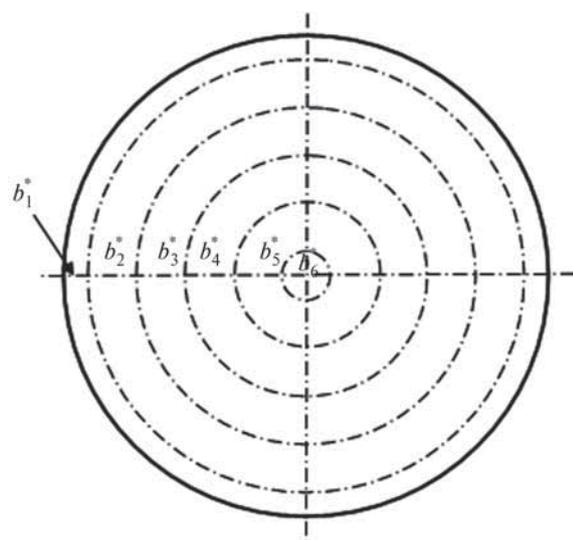


Рис. 6. Схема разбивки сечения выхлопной трубы на секторы

Fig. 6. Scheme of dividing the section of the exhaust pipe into sectors

Для эксперимента использовалась пыль из сушильных барабанов асфальтобетонного завода «Дон-спецпром» (г. Макеевка), дисперсионный состав которой представлен в табл. 3.

В бункер загружаем в каждом опыте 4 кг пыли. Перед опытами тщательно вычищались бункер и фильтры 6 и 7. Результаты опытов приведены в табл. 4.

Измерение массы пыли производилось при помощи электронных весов типа SF-400А, точность — 0,1 г.

На рис. 5 показаны графики распределения пыли по сечению выхлопной трубы $G = f(b^*)$ при $Q = \text{const}$.

Как видно из рис. 7 и табл. 4, пыль по сечению выхлопной трубы располагается крайне неравномерно. Наибольшая концентрация пыли наблюдается у внутренних стенок выхлопной трубы и в центре. Причем с уменьшением объема бункера концентрация пыли у стенок возрастает незначительно, в то время как в центре выхлопной трубы с уменьшением объема бункера концентрация пыли стремительно растет, и тем больше, чем меньше объем бункера.

Табл. 3. Дисперсионный состав пыли

Table 3. Dispersion composition of dust

d , мкм / μm	1,6	2,5	4,0	6,3	10	16	25
G , мас. % / mass percent	97,7	96	92,5	87,6	77	62	36
V , см/с / cm/s	0,019	0,049	0,12	0,3	0,77	1,9	4,9
$d_{50} = 20$ мкм / μm				$\rho = 2600$ кг/м ³ / kg/m ³			

Табл. 4. Результаты измерений распределения пыли по сечению выхлопной трубы

Table 4. Results of measurements of dust distribution over the cross section of the exhaust pipe

Фактор b^* / Factor b^*		$(1-0,9)R_2$	$(0,9-0,7)R_2$	$(0,7-0,5)R_2$	$(0,5-0,3)R_2$	$(0,3-0,1)R_2$	$(0,1-0)R_2$	ΣG	КПД, % / Efficiency, %	
Значение, мм / Value, mm		9	18	18	18	18	9			
Объем бункера Q / Hopper volume Q	1	G	130	42	4	3	10	31	220	94,5
	2	G	122	44	3	3	14	33	219	94,5
	3	G	140	50	4	4	16	24	238	94,0

Фактор b^* Factor b^*			$(1-0,9)R_2$	$(0,9-0,7)R_2$	$(0,7-0,5)R_2$	$(0,5-0,3)R_2$	$(0,3-0,1)R_2$	$(0,1-0)R_2$	ΣG	КПД, % Efficiency, %
Значение, мм Value, mm			9	18	18	18	18	9		
Объем бункера Q Hopper volume Q	4	G	119	43	1	1	18	34	216	94,6
	5	G	125	44	2	2	19	40	231	94,2
Среднее значение / Mean			127,2	44,6	2,8	2,4	15,4	32,4	224,8	94,36
$0,8Q$	Среднее Average	G	136,4	44,8	4	4	16,8	58,6	268,6	93,3
$0,5Q$	Среднее Average	G	157,2	50,8	5,6	7,2	38,8	139,6	399,2	90,0
$0,2Q$	Среднее Average	G	191,4	73,2	12,6	14,2	105,4	358,8	755,6	81,1

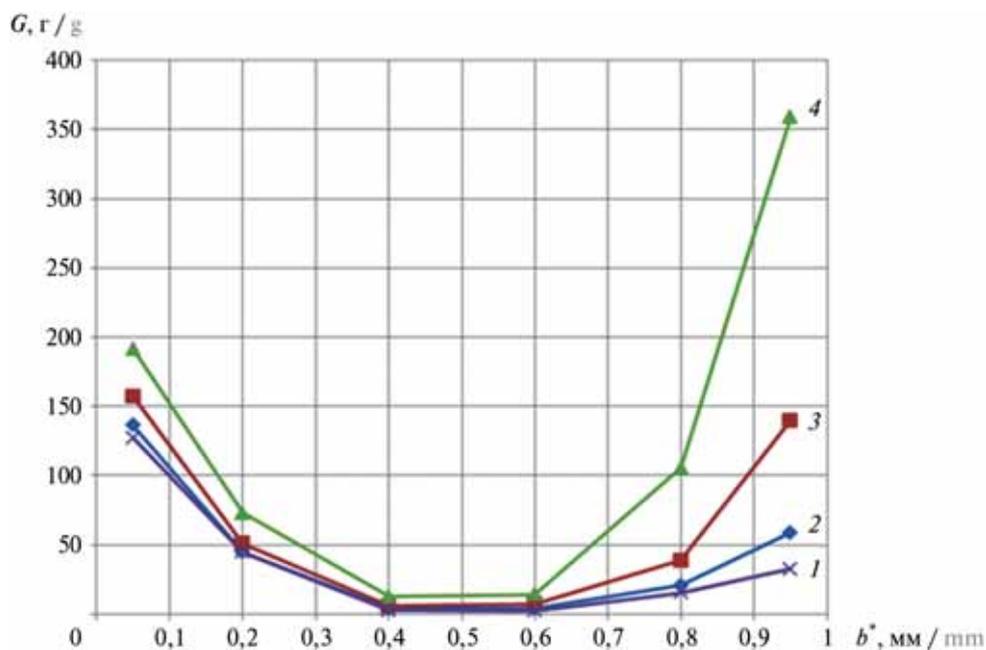


Рис. 7. Графики распределения пыли по секторам $G = f(b^*)$ при: 1 — Q ; 2 — $0,8Q$; 3 — $0,5Q$; 4 — $0,2Q$

Fig. 7. Graphs of dust distribution by sectors $G = f(b^*)$ at: 1 — Q ; 2 — $0,8Q$; 3 — $0,5Q$; 4 — $0,2Q$

При этом значительно снижается КПД циклона. Это явление имеет логическое объяснение: у внутренней стенки выхлопной трубы концентрируется пыль, не уловленная в пространстве между корпусом циклона и выхлопной трубой; в центре циклона присутствует пыль, вымываемая из бункера, и тем интенсивнее, чем меньше объем бункера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании принятых обоснованных допущений выполнены теоретические и экспериментальные исследования гидродинамических процессов восходящего вихря циклона. При этом:

- за счет высокой угловой скорости восходящего вихря сила радиального градиента давления на частицу пыли имеет значение, соизмеримое с центробежной силой, и должна учитываться;
- решение уравнения баланса сил относительно скорости дрейфа частицы показало, что восходящий вихрь состоит из двух зон: одной зоны, где сила градиента давления превышает центробежную силу, и другой, где центробежная сила больше градиентной силы; причем граница раздела находится ровно на половине радиуса восходящего вихря при всех конструктивных и эксплуатационных параметрах работы циклона;

- проведенные экспериментальные исследования полностью подтвердили адекватность полученной математической модели, максимальное расхождение между теоретическими и экспериментальными данными составляет 8,6 %;
- за счет силы радиального градиента давления пыль в восходящем вихре циклона сосредоточена

крайне неравномерно, наибольшая концентрация наблюдалась у стенок выхлопной трубы и по оси циклона. Если концентрация пыли у стенок выхлопной трубы практически не зависела от объема бункера, то в центральной части эта зависимость была ярко выражена, имея обратно пропорциональную зависимость.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Menzelitseva N.V., Azarov V.N., Karapuzova N.Y., Redhwan A.* Main trends of dust conditions normalizing at cement manufacturing plants // *International Review of Civil Engineering (IRECE)*. 2015. Vol. 6. Issue 6. P. 145. DOI: 10.15866/irece.v6i6.6181
2. *Azarov V.N., Evtushenko A.I., Batmanov V.P., Strelyaeva A.B., Lupinogin V.V.* Aerodynamic characteristics of dust in the emissions into the atmosphere and working zone of construction enterprises // *International Review of Civil Engineering (IRECE)*. 2016. Vol. 7. Issue 5. P. 132. DOI: 10.15866/irece.v7i5.9869
3. *Левин Л.С.* Пылеулавливание в металлургии : справочник / под ред. А.А. Гурвица. М. : Металлургия, 1984. 335 с.
4. *Луговский С.И.* Совершенствование систем промышленной вентиляции. М. : Стройиздат, 1991. 131 с.
5. Справочник по пыле- и золоулавливаю / под общ. ред. А.А. Русанова. М. : Энергия, 1975. 296 с.
6. *Алиев Г.М.* Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок: учеб. для сред. ПТУ. М. : Металлургия, 1988. 368 с.
7. *Bart W.* Berechnung und Auslegung von Zyklonabscheidern auf Grund neuerer Untersuchungen // *Brennst. Wärme Kraft*. 1956. No. 8. Pp. 1–9.
8. *Ter Linden A.J.* Investigations into Cyclone Dust Collectors // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1949. Vol. 160. Issue 1. Pp. 233–251. DOI: 10.1243/pime_proc_1949_160_025_02
9. *Stairmand C.J., Kelsey R.N.* Chemistry and industry. 1955. P. 1324.
10. Патент № 29593 Україна МПК В01D45/00 / заявлено 05.03.2007; опубл. 25.01.2008/
11. Патент № 63893 Україна МПК В01D45/00 / заявлено 18.03.2011; опубл. 25.10.2011/
12. *Орлов С.М., Романенко Б.Р., Орлова А.Я.* Повышение энергоэффективности циклонов // *Современное промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 5 (139). С. 16–25.
13. *Дейч М.Е.* Гидрогазодинамика. М. : Энергоатомиздат, 1984. 384 с.
14. *Орлов С.М.* Исследование гидродинамических характеристик восходящего вихря циклона // *Современное промышленное и гражданское строительство*. 2019. Т. 15. № 4. С. 171–178.
15. *Василевский М.В.* Обеспыливание газов инерционными аппаратами: монография. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 248 с.
16. *Kim I., Elghobashi S., Sirignano W.A.* On the equation for spherical-particle motion: effect of Reynolds and acceleration numbers // *Journal of Fluid Mechanics*. 1998. Vol. 367. Pp. 221–253. DOI: 10.1017/s0022112098001657
17. *Швыдкий В.С.* Очистка газов: справочник. М. : Теплотехник, 2005. 640 с.
18. *Орлов С.М., Орлова А.Я.* Исследование целесообразности применения циклонов «правого» и «левого» направления вращения в северном полушарии Земли // *Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури*. 2014. № 5 (109). С. 29–35.
19. Методика проведения замеров аэродинамических характеристик. М. : НИИОГАЗ, 1983. 32 с.
20. *Алешин Р.Р., Егоров С.А.* Постановка однофакторного эксперимента. Иваново, 2017. 17 с.
21. *Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1976. 279 с.

Поступила в редакцию 20 мая 2021 г.

Принята в доработанном виде 19 августа 2021 г.

Одобрена для публикации 19 августа 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Александр Васильевич Лукьянов** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции; **Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДонНАСА)**; Донецкая Народная Республика, 286123, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2; РИНЦ ID: 584954; a.v.lukyjanov@donnasa.ru;

Станислав Михайлович Орлов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции; **Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДонНАСА)**; Донецкая Народная Республика, 286123, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2; s.m.orlov@donnasa.ru;

Борис Романович Романенко — аспирант, ассистент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции; **Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДонНАСА)**; Донецкая Народная Республика, 286123, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2; b.r.romanenko@donnasa.ru.

REFERENCES

1. Menzelitseva N.V., Azarov V.N., Karapuzova N.Y., Redhwan A. Main trends of dust conditions normalizing at cement manufacturing plants. *International Review of Civil Engineering (IRECE)*. 2015; 6(6):145. DOI: 10.15866/irece.v6i6.6181
2. Azarov V.N., Evtushenko A.I., Batmanov V.P., Strelyaeva A.B., Lupinogin V.V. Aerodynamic characteristics of dust in the emissions into the atmosphere and working zone of construction enterprises. *International Review of Civil Engineering (IRECE)*. 2016; 7(5):132. DOI: 10.15866/irece.v7i5.9869
3. Levin L.S. *Dust collection in metallurgy* / ed. A.A. Gurvits. Moscow, Metallurgy Publ., 1984; 336. (rus.).
4. Lugovsky S.I. *Improvement of industrial ventilation systems*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1991; 136. (rus.).
5. *Handbook of dust and ash collection* / under total. ed. A.A. Rusanova. Moscow, Energy Publ., 1975; 296. (rus.).
6. Aliev G.M. *Device and maintenance of gas cleaning and dust collecting installations*. Moscow, Metallurgy Publ., 1988; 368. (rus.).
7. Bart W. Berechnung und Auslegung von Zyklonabscheidern auf Grund neuerer Untersuchungen. *Brennst. Wärme Kraft*. 1956; 8:1-9.
8. Ter Linden A.J. Investigations into Cyclone Dust Collectors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1949; 160(1):233-251. DOI: 10.1243/pime_proc_1949_160_025_02
9. Stairmand C.J., Kelsey R.N. *Chemistry and industry*. 1955; 1324.
10. Patent No. 29593 Ukraine IPC B01D45 / Declared 05.03.2007; publ. 01.25.2008.
11. Patent No. 63893 Ukraine IPC B01D45 / Declared 18.03.2011; publ. 10.25.2011.
12. Orlov S.M., Romanenko B.R., Orlova A.Ya. Increasing the energy efficiency of cyclones. *Modern Industrial and Civil Construction*. 2019; 5(139):16-25. (rus.).
13. Deich M.E. *Fluid dynamics*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984; 384. (rus.).
14. Orlov S.M. Study of the hydrodynamic characteristics of an ascending cyclone vortex. *Modern Industrial and Civil Construction*. 2019; 15(4):171-178. (rus.).
15. Vasilevsky M.V. *Dedusting of gases by inertial devices : monograph*. Tomsk, Publishing house of the Tomsk Polytechnic University, 2008; 248. (rus.).
16. Kim I., Elghobashi S., Sirignano W.A. On the equation for spherical-particle motion: effect of Reynolds and acceleration numbers. *Journal of Fluid Mechanics*. 1998; 367:221-253. DOI: 10.1017/S0022112098001657
17. Shvydkiy V.S. *Gas cleaning: a reference book*. Moscow, Teplotekhnika Publ., 2005; 640. (rus.).
18. Orlov S.M., Orlova A.Ya. Investigation of the feasibility of using cyclones “right” and “left” directions of rotation in the northern hemisphere of the Earth. *Bulletin of Donbass National Academy of Education and Architecture*. 2014; 5(109):29-35. (rus.).
19. *Technique for measuring aerodynamic characteristics*. Moscow, NIIOGAZ Publ., 1983; 32. (rus.).
20. Aleshin R.R., Egorov S.A. *Setting up a one-factor experiment*. Ivanovo, 2017; 17. (rus.).
21. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovsky Yu.V. *Planning an experiment when searching for optimal conditions*. Moscow, Nauka Publ., 1976; 178. (rus.).

Received May 20, 2021.

Adopted in revised form on August 19, 2021.

Approved for publication on August 19, 2021.

BIONOTES: **Alexander V. Lukyanov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation; **Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA)**; 2 Derzhavin st., Makeevka, 286123, Donetsk People’s Republic; ID RISC: 584954; a.v.lukyanov@donnasa.ru;

Stanislav M. Orlov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation; **Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA)**; 2 Derzhavin st., Makeevka, 286123, Donetsk People’s Republic; s.m.orlov@donnasa.ru;

Boris R. Romanenko — postgraduate student, assistant of the Department of Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation; **Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA)**; 2 Derzhavin st., Makeevka, 286123, Donetsk People’s Republic; b.r.romanenko@donnasa.ru.

Принципы стратегического планирования развития «зеленой» инфраструктуры городской среды

О.Н. Дьячкова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Перспективным направлением природопользования, позволяющим избежать деградации биосферы, является осуществление хозяйственной и иной деятельности с минимальным воздействием на природу. Состояние здоровья населения находится под влиянием комплекса факторов среды обитания, включающего группы: социально-экономические, санитарно-гигиенические, образа жизни, степень воздействия которых на человека различна во времени и пространстве. Нагрузку атмосферного воздуха воспринимают органы дыхания, зрения, кожный покров. Вода оказывает влияние в виде выпадающих атмосферных осадков, как питьевая и рекреационная. Прямое воздействие почвы на состояние здоровья человека происходит через непосредственный контакт с кожей, ингаляционное и пероральное поступления в организм. Существенное влияние на качество урбанизированных почв, воды и воздуха, а также здоровья жителей оказывают зеленые насаждения. Основным аспектом охраны окружающей среды и поддержания благоприятного микроклимата в населенных пунктах — сохранение и воссоздание «зеленого» фонда.

Материалы и методы. Проведен системный анализ научной литературы, статистических данных, нормативных документов.

Результаты. Приведена зависимость россиян от влияния санитарно-гигиенических факторов среды обитания. Рассмотрена динамика показателя «озелененные пространства» в индексе качества городской среды для группы «крупнейшие города». На примере Санкт-Петербурга показана удовлетворенность жителей в сфере озеленения территорий районов города. Основные проблемы развития «зеленой» инфраструктуры предложено условно разделять на группы. Определены концептуальные принципы, составляющие методологическую основу создания «зеленого» каркаса населенного пункта. Сформирована группа критериев оценки «зеленой» инфраструктуры, являющихся индикаторами технической прогрессивности и социальной значимости, обладающих прогнозирующей способностью и взаимосогласованностью.

Выводы. Необходимое и достаточное количество зеленых насаждений, нормализуя качество городской среды, способно оказывать положительное влияние на физическое и психическое здоровье жителей. Стратегическое планирование развития «зеленой» инфраструктуры населенного пункта, обеспечивая жизнеспособность зеленого каркаса, должно учитывать все его элементы и для компенсации нагрузок урбанизации включать озеленение земельных участков придомовых территорий многоквартирных домов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: устойчивое развитие, экологическая безопасность, охрана окружающей среды, градостроительная деятельность, городское хозяйство, озеленение территории, зеленые насаждения, многоквартирный дом

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дьячкова О.Н. Принципы стратегического планирования развития «зеленой» инфраструктуры городской среды // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 8. С. 1045–1064. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1045-1064

Principles of strategic planning for the development of “green” infrastructure of the urban environment

Olga N. D'yachkova

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

ABSTRACT

Introduction. A promising direction of nature management, which allows avoiding the degradation of the biosphere, is the implementation of economic and other activities with minimal impact on nature. The state of health of the population is influenced by a complex of environmental factors. The load of atmospheric air is perceived by the respiratory organs, vision, and the skin. Water influences in the form of precipitation, both drinking and recreational. The direct effect of soil on human health occurs through direct contact with the skin, inhalation and oral intake into the body. Green spaces have a significant impact on the quality of urbanized soil, water and air, as well as the health of residents. The main aspect of environmental protection and maintaining a favorable microclimate in settlements is the preservation and recreation of the “green” fund.

Materials and methods. Systematic analysis of scientific literature, statistical data, regulatory documents.

Results. The dependence of Russians on the influence of sanitary and hygienic factors of the environment is shown. The dynamics of the indicator “green spaces” in the urban environment quality index for the group “largest cities” is considered. On the example of St. Petersburg, the satisfaction of residents with the sphere of landscaping the territories of city districts is shown. It is proposed to conditionally divide the main problems of the development of “green” infrastructure into groups. The conceptual principles that constitute the methodological basis for the creation of a “green” frame of a settlement have

been determined. Formed a group of criteria for assessing the “green” infrastructure, which are indicators of technical progressivity and social significance, with predictive ability and consistency.

Conclusions. The necessary and sufficient amount of green spaces, normalizing the quality of the urban environment, can have a positive impact on the physical and mental health of residents. Strategic planning for the development of the “green” infrastructure of the settlement, ensuring the viability of the green frame, should take into account all its elements and include landscaping of land plots adjacent to the territories of multi-family dwelling.

KEYWORDS: sustainable development, environmental safety, environmental protection, urban planning activities, urban economy, landscaping of the territory, green spaces, multi-family dwelling

FOR CITATION: D'yachkova O.N. Principles of strategic planning for the development of “green” infrastructure of the urban environment. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(8):1045-1064. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1045-1064 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В мире и в России перспективным направлением природопользования, позволяющим избежать деградации биосферы, все больше становится осуществление хозяйственной и иной деятельности с минимальным воздействием на природную среду, плановая ликвидация последствий накопленного экологического ущерба [1–6]. Актуально формирование комфортной городской среды посредством применения «зеленых» технологий [7–10].

Под влиянием техногенной деятельности человека происходят изменения в природе, корректируется температурно-влажностный режим, сокращается биоразнообразие [11–13]. Поэтому основным аспектом охраны окружающей среды и поддержания благоприятного микроклимата в населенных пунктах является сохранение «зеленого» фонда [14–17].

Создание «зеленых» поясов, объединенных в «зеленый» каркас города, представляет собой комплекс задач [18–20], требующих системного решения [21–26], опирающегося на результаты научных исследований [27–31], основанных на практическом опыте [32–40]. В градозоологических системах «здоровых» городов создаются и эксплуатируются средозащитные объекты озеленения [41–45].

В многочисленных работах исследуется роль зеленых насаждений в защите живой природы и человека [46], в публикациях показано благотворное влияние озелененных территорий, снижающих вредные воздействия [47–50] техногенных городских объектов [51], в частности транспортной инфраструктуры [52–54], промышленности, жилищно-коммунального-хозяйства [55–58] на биоту.

Здоровье человека характеризуется состоянием полного физического, психического и социального благополучия, а не только отсутствием болезней или физических недостатков [59–62]. Одним из факторов, влияющих на здоровье, служит окружающая среда [63–66]. Современным городским районам свойственны плотная застройка, интенсивное движение, загрязнение, шум [67–70]. Ученым сообществом изучаются факторы негативной нагрузки, вызванные ростом урбанизации, градостроительной деятельностью, и предлагаются решения по нормализации воздействий [71–73].

Место проживания индивидуума влияет на его здоровье [74, 75], поэтому благоустройство жилых кварталов, включая степень их озеленения, качество зеленых насаждений, имеет большее значение [76, 77]. На основе концепции природоподобных технологий среды жизнедеятельности и биоопозитивных инновационных продуктов совершенствуется нормативно-техническая документация, вносятся изменения в законодательство [78–81]. Однако городская администрация, органы местного самоуправления уделяют недостаточно внимания зеленым насаждениям придомовых земельных участков на этапах жизненного цикла многоквартирных домов [82–86]. Современному населенному пункту требуется стратегическое планирование развития «зеленой» инфраструктуры городской среды, учитывающее изменения всех составляющих «зеленого» фонда, обусловленных ростом урбанизации [87, 88].

Цель настоящего исследования — обоснование потребности стратегического планирования развития «зеленой» инфраструктуры того или иного населенного пункта, способствующего эффективному использованию ресурсов городской среды. Задача — сформировать методологические основы технологии «зеленой» инфраструктуры городской среды, применяя факторный анализ данных, представленных в открытых источниках.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для достижения поставленной цели и задачи выполнен системный анализ научной литературы соответствующей тематики, выявлены существующие проблемы и перспективные решения. Проведен обзор аналитической информации о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения Российской Федерации в разрезе влияния комплекса санитарно-гигиенических факторов на здоровье населения, приведены степень влияния и прогноз. В методике формирования индекса качества городской среды выделен тип пространства города «Озелененные пространства», приведены входящие в состав факторы, формирующие среду обитания, и в сравнении даны показатели индикаторов российских городов с населением свыше 1 млн чел. Осуществлен ретроспективный анализ комплекса статистических и аналитических данных Санкт-Петербурга об объ-

еме и качестве зеленых насаждений. Выполнен системный анализ нормативно-правовых документов соответствующей тематики, действующих в границах указанного субъекта РФ, определены ключевые аспекты. На основе результатов проведенного факторного анализа информации научных и нормативно-правовых источников, статистических и аналитических данных, методологические основы системотехники (А.А. Гусаков) спроецированы на технологию «зеленой» инфраструктуры городской среды.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Среда, качество которой обеспечивает устойчивое функционирование образующих ее компонент, является благоприятной [89, 90]. Сохранение для настоящего и будущих поколений здоровых природных систем становится одной из актуальных проблем устойчивого развития урбанизированной территории. Качество среды — это ее состояние, которое характеризуется тем или иным индикатором или их комплексом [91, 92]. Природные, природно-техногенные и техногенные вызовы компонентам окружающей среды, приводящие к загрязнению атмосферного воздуха, почвы, водных ресурсов в стране, устойчиво связаны с состоянием здоровья ее жителей [63].

Нагрузку атмосферного воздуха воспринимают органы дыхания, зрения, кожный покров. Вода оказывает влияние в виде выпадающих атмосферных осадков, как питьевая и рекреационная [92]. Прямое воздействие почвы на состояние здоровья человека

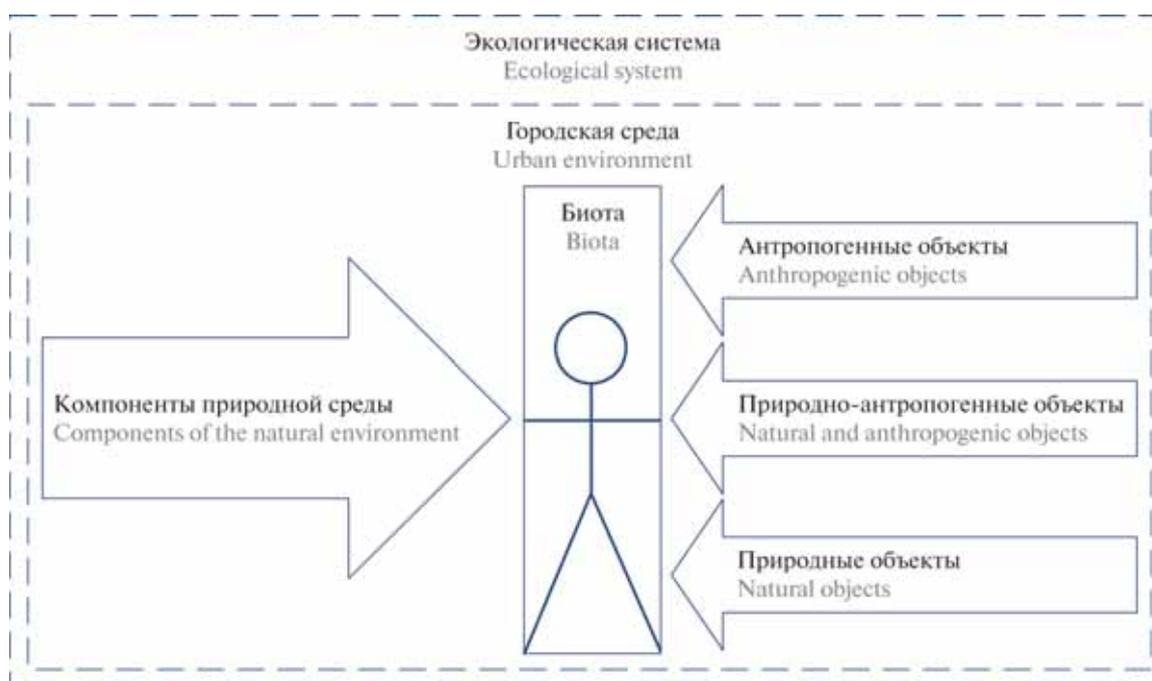
происходит через непосредственный контакт с кожей, ингаляционное и пероральное поступления в организм [91]. Поскольку качество воздуха, воды и почвы по тем или иным параметрам не всегда соответствует действующим нормативам, градостроительные решения, коммунальная и транспортная инфраструктура не оптимальны, а имеющийся в городе естественный регулятор — зеленый фонд — по объему, составу, территориальному размещению элементов не везде достаточен, в целом и по отдельности негативные факторы городской экосистемы могут представлять опасность для здоровья человека [63]. Население, проживающее на территории, находится под постоянным воздействием нагрузок от городской среды (рис.). Уровень нагрузки воспринимается по-разному и зависит от социальной группы, к которой принадлежит индивидуум, например, возраст, пол, масса тела, продолжительность нахождения на территории и пр.

Комплекс факторов среды обитания, оказывающих влияние на состояние здоровья человека, включает группы¹ [63]:

- социально-экономические факторы;
- санитарно-гигиенические факторы;
- факторы образа жизни.

С течением времени приоритетность влияния той или иной группы факторов среды обитания на со-

¹ О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2019 году: государственный доклад. М. : Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2020. 299 с.



Модель влияния городской среды на человека

Model of the influence of the urban environment on people

стояние здоровья населения страны меняется [63]. Однако, несмотря на то, что численность населения, подверженного влиянию санитарно-гигиенических факторов, за период с 2012 по 2019 гг. снизилась почти на 10 %, более половины населения страны ежегодно ощущает негативное воздействие этой группы. По коэффициентам корреляционной зависимости уровень влияния группы санитарно-гигиенических факторов на ключевой целевой показатель развития страны — ожидаемую продолжительность жизни в 2013 г. составлял 0,55; в 2014 г. — 0,38; на среднесрочный период до 2024 г. прогнозируется 0,43¹ [63].

К санитарно-гигиеническим факторам, формирующим негативные тенденции в состоянии здоровья населения, относятся¹ [63]:

- комплексная химическая нагрузка (химическое загрязнение пищевых продуктов, питьевой воды, атмосферного воздуха и почвы);
- комплексная биологическая нагрузка (биологическое загрязнение пищевых продуктов, питьевой воды и почвы);
- комплексная нагрузка, связанная с физическими факторами (шум, вибрация, ультразвук, инфразвук, тепловые, ионизирующие, неионизирующие и иные излучения).

При наметившейся тенденции снижения комплексной химической нагрузки на население продолжает оставаться стабильным уровень воздействия комплекса биологических факторов и развития негативной тенденции увеличения воздействия физических факторов¹ (табл. 1) [63].

Вероятный темп снижения первичной заболеваемости населения на уровне 0,3 % в год и темп сни-

жения смертности населения на уровне 0,66 % в год, что соответствует увеличению ожидаемой продолжительности жизни на 0,04 %, прогнозируется в случае улучшения качества объектов окружающей среды на фоне улучшения социально-экономических показателей и образа жизни¹ [63].

Прогноз развития санитарно-эпидемиологической ситуации в РФ и состояния здоровья россиян основан на вероятности, что в период до 2024 г. сохранятся базовые параметры вклада во влияние на здоровье населения групп факторов среды обитания¹ [63]:

- социально-экономические факторы — 40–42 %;
- санитарно-гигиенические факторы — 28–32 %;
- факторы образа жизни — 27–31 %.

Существенное влияние на качество урбанизированных почв, воды и воздуха, а также здоровье жителей оказывают зеленые насаждения [46–50, 59–66].

Индекс качества городской среды формируется Минстроем России. Результаты расчета индекса используются в реализации положений Указа Президента Российской Федерации от 21.07.2020 № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года», национального проекта «Жилье и городская среда»².

Федеральным проектом «Формирование комфортной городской среды», национальным проектом «Жилье и городская среда» к концу 2024 г. предус-

² Минстрой России. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/>

Табл. 1. Зависимость населения Российской Федерации от влияния санитарно-гигиенических факторов¹ [63]
Table 1. Dependence of the population of the Russian Federation on the influence of sanitary and hygienic factors¹ [63]

Год Year	Вид нагрузки Load type					
	комплексная химическая нагрузка complex chemical load		комплексная биологическая нагрузка complex biological load		комплексная нагрузка, связанная с физическими факторами complex load associated with physical factors	
	Подверженность воздействию нагрузки Exposure to stress					
	количество субъектов РФ, ед. / численность населения, млн чел. how many subjects, amt / how many people, million people	численность населения, % how many people, %	количество субъектов РФ, ед. / численность населения, млн чел. how many subjects, amt / how many people, million people	численность населения, % how many people, %	количество субъектов РФ, ед. / численность населения, млн чел. how many subjects, amt / how many people, million people	численность населения, % how many people, %
2012	48 / 89,1	62,6	35 / 64,4	45,3	33 / 52,9	37,1
2018	46 / 82,8	56,4	38 / 64,2	43,7	27 / 56,3	38,4
2019	41 / 81,3	55,4	36 / 59,4	40,5	30 / 67,5	46,0

мотрено повышение индекса качества городской среды на 30 %, соответственно сокращение количества городов с неблагоприятной средой — в два раза².

Для определения индекса качества городской среды субъекта Российской Федерации в целом, а также входящих в его состав населенных пунктов используются 36 индикаторов, характеризующих шесть типов пространств города, которые оцениваются по шести факторам, формирующим среду обитания³.

Одним из шести типов пространств города установлен тип «Озелененные пространства». Факторы, формирующие среду обитания, оцениваются индикаторами, соответственно⁴.

- «Безопасность» — «Доля озелененных территорий общего пользования в общей площади зеленых насаждений». Индикатор позволяет оценить степень комфорта и безопасности озелененных территорий в целом и, в частности, природного озеленения в городской черте.

- «Комфортность» — «Уровень озеленения». Определяется как доля площади городских территорий, покрытой зелеными насаждениями, в общей площади города. Индикатор дает возможность оценить потенциал для развития озелененных территорий общего пользования, а также для повышения экологической безопасности горожан с учетом основных свойств зеленых насаждений (поглощение пыли, шума, углекислого газа и выделение кислорода, фильтрация сточных вод и пр.).

- «Экологичность и здоровье» — «Состояние зеленых насаждений». Индикатор позволяет оценить биопродуктивность зеленых насаждений, состояние природной среды в городе в целом — качество воздуха, уровень загрязненности почв и поверхностных вод.

- «Идентичность и разнообразие» — «Привлекательность озелененных территорий». Индикатор характеризует разнообразие и идентичность озелененных пространств, привлекательность озелененных территорий для горожан. Устанавливается по числу релевантных фотографий в социальных сетях. Позволяет оценить качество благоустройства озелененных территорий, их функциональное разнообразие и идентичность [93].

- «Современность и актуальность среды» — «Разнообразие услуг на озелененных территориях». Рассчитывается по числу точек предоставления рекреационных возможностей в границах озелененных территорий. Дает возможность оценить их функциональное разнообразие, в том числе обеспечение

³ Об утверждении Методики формирования индекса качества городской среды: Распоряжение Правительства РФ от 23.03.2019 № 510-р.

⁴ Руководство по определению первоочередных направлений развития городской среды с помощью индекса качества городской среды. URL: https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/133/rukovodstvo_index_compressed.pdf

условий для круглогодичного отдыха, спортивных занятий.

- «Эффективность управления» — «Доля населения, имеющего доступ к озелененным территориям общего пользования (городские леса, парки, сады и др.), в общей численности населения». Позволяет оценить возможности горожан для посещения озелененных территорий на ежедневной основе в пешеходной доступности от жилых домов, потенциал для закрепления у населения привычки к здоровому образу жизни за счет досуга на свежем воздухе.

Разработанный Минстроем России совместно с институтом развития «ДОМ.РФ» и «КБ Стрелка» индекс качества городской среды не является рейтингом, а служит инструментом для работы каждого города над собственными зонами роста².

Зеленый город может иметь низкую оценку показателя «Озелененные пространства», так как наличие большой площади озелененных территорий не гарантирует высокое значение индикатора, необходимо благоустраивать существующие территории, повышая их привлекательность для горожан⁴.

Российские города различаются по размеру и климатическим условиям. В индексе они делятся на группы в зависимости от численности населения и климата. Соответственно, сравниваются города только в рамках их размерно-климатических групп. В 2020 г. индекс подсчитан для 1116 российских городов. В группу «Крупнейшие» входят 15 городов с населением от 1 млн человек² (табл. 2).

Город федерального значения Санкт-Петербург — самый северный город мира с населением свыше миллиона человек. Расположен у восточной части Финского залива Балтийского моря в пределах Приневской низины. Рельеф города, несмотря на общую равнинность, разнообразен по происхождению, строению и возрасту. Климат умеренный — переходный от умеренно-континентального к умеренно-морскому. На протяжении большей части года преобладают дни с облачной, пасмурной погодой и рассеянным освещением. Характерна частая смена воздушных масс, обуславливающая часто меняющиеся погодные условия. По географическому местоположению город находится в зоне избыточного увлажнения. Влажность воздуха обычно высокая. Средняя годовая температура воздуха составляет 5,6 °С.

Городские озелененные территории существуют в условиях невысокой среднегодовой температуры и ненормированного прихода суммарной солнечной радиации, что требует от растений проявления высоких адаптивных способностей. Высокая влажность и частые перепады зимних температур из отрицательного в положительный диапазон снижают устойчивость растений в холодный период года.

В границах Санкт-Петербурга находятся не только урбанизированные территории с преимущественно

Табл. 2. Динамика показателя «Озелененные пространства» в индексе качества городской среды для группы «Крупнейшие города»²Table 2. Dynamics of the indicator “Green spaces” in the urban environment quality index for the group “Largest cities”²

Город City	Значение показателя «Индекс качества городской среды» за год, балл The value of the indicator “Quality index of the urban environment” for the year, points			Значение показателя «Озелененные пространства» за год, балл The value of the indicator “Green spaces” for the year, points		
	2018	2019	2020	2018	2019	2020
Волгоград Volgograd	116	159	159	9	21	22
Воронеж Voronezh	154	164	176	18	26	26
Екатеринбург Yekaterinburg	191	188	194	17	21	22
Казань Kazan	190	201	204	30	32	32
Красноярск Krasnoyarsk	189	181	181	26	26	28
Москва Moscow	276	283	288	32	40	42
Нижний Новгород Нижний Новгород	190	193	201	33	31	32
Новосибирск Novosibirsk	161	158	166	27	26	24
Омск Omsk	104	106	113	16	15	18
Пермь Perm	153	168	179	29	37	36
Ростов-на-Дону Rostov-on-Don	178	193	200	17	16	24
Самара Samara	163	159	168	27	29	27
Санкт-Петербург St. Petersburg	238	243	249	44	45	41
Уфа Ufa	179	182	189	40	43	43
Челябинск Chelyabinsk	160	161	170	25	23	28

унифицированным составом городской флоры и фауны, но и природные экосистемы, сохраняющие биологическое разнообразие, свойственное местности.

В табл. 3 показаны изменения в соотношении площадей городских земель и зеленых насаждений в пределах городской черты за последние 14 лет. Показатель «Общая площадь городских земель в пределах городской черты» включает земли и водные пространства, расположенные в пределах официально утвержденной городской черты по состоянию на конец отчетного года, также учитываются и земли, изъятые из непосредственного ведения городской исполнительной власти⁵. В показатель «Общая площадь зеленых насаждений в пределах городской черты»

включаются специально посаженные или естественные городские леса, зеленые и защитные зоны и лесопарки, бульвары, скверы, сады и газоны, общегородские и районные парки культуры и отдыха, стадионы, кладбища, насаждения в жилых районах, на приусадебных участках, внутриквартальное озеленение, ботанические и зоологические сады и другие виды озеленения ограниченного пользования и специального назначения⁵.

Зеленые насаждения Санкт-Петербурга характеризуются разрозненностью положения в исторически сложившейся городской застройке и отсутствием связанных «зеленых поясов», что обусловлено большим количеством рек и каналов, а также историей развития городских территорий.

⁵ ЕМИСС. URL: <https://fedstat.ru/>

Табл. 3. Динамика изменения площадей городских земель и зеленых насаждений в Санкт-Петербурге за 2007–2020 гг.⁵
Table 3. Dynamics of change in the area of urban land and green spaces in St. Petersburg for the period 2007–2020 year⁵

Значение показателя за год, га Indicator for the year, hectare	Наименование показателя Indicator	
	Общая площадь городских земель в пределах городской черты The total area of urban land within the city limits	Общая площадь зеленых насаждений в пределах городской черты The total area of green spaces within the city limits
2007	140 088	37 204
2008	140 088	37 204
2009	140 088	37 204
2010	140 088	37 214
2011	140 313	37 214
2012	140 313	34 190
2013	140 313	34 372
2014	140 313	34 372
2015	140 313	34 372
2016	140 313	39 732
2017	140 313	37 937
2018	140 313	38 595
2019	140 313	38 767
2020	140 313	39 129

Зеленые насаждения представляют собой совокупность озелененных территорий, имеющих разную административную принадлежность. Большая часть территорий зеленых насаждений имеет фиксированные границы, что облегчает управление ими — это территории зеленых насаждений общего пользования; территории зеленых насаждений ограниченного пользования; территории зеленых насаждений, выполняющих специальные функции, в частности уличного озеленения; территории защитных лесов; территории зеленых насаждений особо охраняемых природных территорий (ООПТ).

Наибольшее внимание в садово-парковом хозяйстве города уделяется зеленым насаждениям общего пользования, т.е. общедоступным местам, которые посещают представители разных социальных слоев населения. Придомовые территории и другие озелененные участки на муниципальных территориях часто не имеют законодательно определенных границ и озеленяются жителями стихийно.

Аспект охраны окружающей среды — создание ООПТ (табл. 4). На территории Санкт-Петербурга находятся 15 ООПТ регионального значения, которые относятся к категориям государственные природные заказники и памятники природы, общей площадью около 6142,7 га, что составляет порядка 4 % территории города⁶.

⁶ Администрация Санкт-Петербурга. URL: <https://www.gov.spb.ru/>

Административно-территориальными единицами Санкт-Петербурга являются 18 районов: Адмиралтейский, Василеостровский, Выборгский, Калининский, Кировский, Колпинский, Красногвардейский, Красносельский, Кронштадтский, Курортный, Московский, Невский, Петроградский, Петродворцовый, Приморский, Пушкинский, Фрунзенский, Центральный. ООПТ расположены в семи из них: один памятник природы и три государственных природных заказника общей площадью 3979 га — на территории Курортного района; один памятник природы и три государственных природных заказника общей площадью 1448,2 — на территории Приморского района; два памятника природы и один государственный природный заказник общей площадью 426 га — в Петродворцовом районе; один памятник природы площадью 65 га — в Красносельском районе; один государственный природный заказник площадью 102 га — на территории Кронштадтского района; один памятник природы площадью 96,8 га — в Петроградском районе; один памятник природы площадью 25,7 га — на территории Пушкинского района⁷.

⁷ Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2019 году / под ред. Д.С. Беляева, И.А. Серебрицкого. СПб. : ООО «Типография Глори», 2020. 179 с. URL: https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2020/08/07/57/doklad_2019.pdf

Табл. 4. Количество особо охраняемых природных территорий в Санкт-Петербурге⁵

Table 4. The specially protected natural areas in St. Petersburg⁵

Наименование показателя Indicator	Значение показателя за 2020 год, ед. Indicator for the year, amt
ООПТ федерального, регионального и местного значения, ед. Specially protected natural areas of federal, regional and local significance, amt	18
ООПТ федерального значения, ед. Specially protected natural areas of federal significance, amt	3
ООПТ регионального значения, ед. Specially protected natural areas of regional significance, amt	15
Дендрологические парки и ботанические сады федерального значения, ед. Federal dendrological parks and botanical gardens, amt	3
Государственные природные заказники регионального значения, ед. State nature reserves of regional significance, amt	8
Памятники природы регионального значения, ед. Natural monuments of regional importance, amt	7

По данным серии опросов, проводимых в рамках мониторинга общественного мнения населения Санкт-Петербургским информационно-аналитическим центром, динамика актуальности проблем в сфере озеленения в 2018 г. в среднем по районам города следующая: 19,5 % жителей указали на плохое состояние газонов в своем районе; 21,1 % — на нехватку или запущенное состояние зеленых насаждений; 12,8 % — на отсутствие или недостаточное количество скверов, парков, зон отдыха⁶ (табл. 5). Неудовлетворенность горожан состоянием газонов

в 2018 г. по районам выше среднего уровня: в Невском (31,7 %), Василеостровском (30,0 %), Выборгском (29,7 %), Петроградском (28,8 %), Адмиралтейском (27,0 %) и Центральном (26,7 %) районах; ниже среднего — в Московском (15,0 %), Красносельском (14,0 %), Петродворцовом (13,0 %), Пушкинском (9,5 %), Кронштадтском (7,5 %) и Курортном (6,8 %) ⁶. Оценка горожанами проблемы нехватки или запущенного состояния зеленых насаждений в 2018 г. превышает среднее по районам значение традиционно в четырех плотно застроенных районах

Табл. 5. Динамика актуальности проблем в сфере озеленения районов Санкт-Петербурга⁶

Table 5. Dynamics of the urgency of problems in the field of greening of St. Petersburg districts⁶

Наименование показателя Indicator	Среднее по районам значение показателя за год, % от общего числа респондентов Average regional value of the indicator for the year, % of the total number of respondents										
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Актуальность проблемы плохого состояния газонов Relevance of the problem of poor condition of lawns	28,7	38,1	37,7	34,1	28,8	26,9	8,1	19,5	21,4	22,8	19,5
Актуальность проблемы нехватки или запущенного состояния зеленых насаждений Relevance of the problem of shortage or neglected state of green spaces	27,1	31,0	32,6	31,3	20,4	23,5	16,5	19,2	17,3	21,7	21,1
Актуальность проблемы отсутствия или недостаточного количества скверов, парков, зон отдыха The urgency of the problem of the absence or insufficient number of squares, parks, recreation areas of the population	27,9	26,4	31,0	27,3	18,2	20,6	10,8	16,9	13,7	16,5	12,8

исторического центра — Центральном (39,0 %), Адмиралтейском (36,7 %), Петроградском (35,0 %) и Василеостровском (33,7 %), а также в Невском (31,5 %), Выборгском (30,7 %) и Фрунзенском (26,3 %). Острота рассматриваемой проблемы ниже среднего по районам значения в Колпинском (16,2 %), Петродворцовом (11,3 %), Кронштадтском (10,0 %), Пушкинском (9,2 %) и Курортном (7,5 %)б. Проблема нехватки скверов, парков, зон отдыха в 2018 г. больше, чем в среднем по районам, беспокоит жителей четырех районов исторического центра — Центрального (36,0 %), Василеостровского (35,7 %), Петроградского (30,5 %) и Адмиралтейского (30,2 %), а также Приморского (22,3 %), Выборгского (19,5 %), Невского (19,2 %) и Фрунзенского (17,7 %). Ниже среднего по данной проблеме оценки в Петродворцовом (8,2 %), Пушкинском (7,2 %), Кронштадтском (7,0 %) и Курортном (4,0 %)б.

Постепенное оздоровление и повышение устойчивости зеленых насаждений ведет к комплексу опосредованных воздействий на городскую среду и качество жизни жителей.

Сохранение биоразнообразия растительного и животного мира. Растительные сообщества обеспечивают место обитания для животных, а также грибов, лишайников и микроорганизмов. В первую очередь, это касается крупных массивов.

Солнечная радиация. Зеленые насаждения регулируют режим инсоляции, смягчая эффект повышения температуры воздуха на городской территории по сравнению с фоновой. Данный аспект санитарно-гигиенической функции способны эффективно реализовать насаждения с древостоями или группами деревьев со здоровой, хорошо развитой кроной.

Атмосферный воздух. Зеленые насаждения выполняют санитарно-гигиенические функции, обеспечивая повышение влажности, очищая воздух от мелкодисперсных частиц и других загрязнителей, поглощая углекислый газ и выделяя кислород. Отдельный эффект зеленых насаждений — *улучшение ветровой обстановки в городе.*

Свойство зеленых насаждений понижать шумовые загрязнения достаточно часто используется в градостроительной практике. Очевидно, эффективность насаждений при выполнении функции зависит от их состояния, поскольку отражение и рассеивание звука осуществляется кронами деревьев и кустарников при условии здорового, нормального развития. Однако, как и в случае ветрозащитной функции, шумозащитная реализуется при условии соответствующей планировки насаждений.

Почвы и растительность находятся в тесной взаимосвязи. Улучшение состояния зеленых насаждений ведет к улучшению состава и структуры городских почв. Достаточное количество свободной от того или иного вида покрытия почвы улучшает условия жизни растений и нормализует состояние городской экосистемы.

Общеизвестно, что качество жизни населения, включая физическое и психическое здоровье и зависящие от него стороны жизни, связано, в том числе с доступностью отдыха на озелененных территориях.

Многие зеленые насаждения Санкт-Петербурга являются объектами российского и мирового культурно-исторического наследия. Такие насаждения требуют особых способов и критериев оценки их состояния и функционирования.

Экономические факторы. При условии эффективной планировки насаждения предотвращают эрозийные процессы в почве, в частности береговой линии; оказывают благоприятное влияние на сохранность различных поверхностей и материалов городской инфраструктуры. Положительный эффект оказывают на здоровье и благополучие населения. Повышают рыночную стоимость объектов недвижимости. При этом растения могут оказывать и отрицательные воздействия на капитальные объекты строительства и линейные объекты, разрушая корневыми системами фундаменты зданий, дорожную одежду и пр., представлять опасность для инженерных коммуникаций, например, обрыв проводов, нарушение функционирования подземных трубопроводов и др.; угрозу жизни и здоровью людей, например, ветровальные деревья, аллергены и т.п.

Разработка проектных решений растительных компонентов придомовых территорий осуществляется⁸:

- в соответствии с назначением и планировкой объекта благоустройства;
 - с учетом баланса озеленения земельного участка;
 - подбор посадочного материала проводится с применением адаптированных пород с учетом их устойчивости к воздействию антропогенных факторов;
 - в отношении деревьев в охранных зонах подземных коммуникаций при согласовании с владельцем этих коммуникаций.
- Ремонт газонов включает⁸:
- снятие, вывоз, размещение, утилизацию дернины и износившегося растительного слоя на участках с неудовлетворительным состоянием газона, разработку грунта; разрыхление подстилающего слоя газона (вспашку, боронование или дискование) с выборкой частей сорных растений;
 - устройство, восстановление дренирующего слоя;
 - ремонт, ручное и механизированное устройство газона с добавлением или без растительной земли: подготовку почвы для устройства газона, вы-

⁸ О правилах благоустройства территории Санкт-Петербурга и о внесении изменений в некоторые постановления правительства Санкт-Петербурга : Постановление Правительства Санкт-Петербурга от 09.11.2016 № 961.

равнивание и планировку поверхности газона, посев газонов, гидропосев газонов, устройство газонов из готовых рулонных заготовок, одерновку с заполнением швов растительной землей, прикапывание поверхности газона, полив и внесение удобрений;

- удаление больных или аварийных деревьев, недопущение посадки деревьев в охранной зоне газопроводов, кабельных и воздушных линий электропередач и других инженерных сетей.

Перспективными научными исследованиями для оценки состояния зеленых насаждений в городской среде являются⁹:

- методы оценки состояния насаждений на основе физиономических и морфометрических показателей древесных растений;
- анатомические методы оценки состояния древесных растений;
- физиолого-биохимические и химические (биогеохимические) методы оценки состояния древесных растений и насаждений;
- методы оценки состояния насаждений как участков территории;
- использование фитооптических свойств растительности как показателя ее состояния;
- индекс листовой поверхности;
- выявление индикаторов качества городского озеленения.

Зеленые насаждения населенного пункта представляют особый элемент городской среды и область пересечения интересов различных социальных групп и контрагентов. Состояние и перспективы развития зеленых насаждений составляют комплекс сложных научных и практических задач. Организация проектирования городской «зеленой» системы может быть разделена на две, имеющие существенные отличительные особенности, стадии¹⁰:

- макропроектирование — определение структуры системы городского «зеленого» фонда в целом и ее функциональных связей с окружающей внешней средой;
- микропроектирование — конструирование элементов системы городского «зеленого» фонда.

Основные проблемы развития «зеленой» инфраструктуры взаимосвязаны — либо взаимовключают, либо взаимообуславливают, либо взаимодополняют друг друга, и их условно можно разделить на пять групп¹⁰:

- технические;
- организационные;
- экономические;

- плановые;
- управленческие.

Концептуальными принципами, составляющими методологическую основу создания «зеленого» каркаса населенного пункта, являются¹⁰:

- функционально-системный принцип, который позволяет построить логику проектирования систем «зеленого» фонда;
- вероятностно-статистический принцип, характерной особенностью которого служит переход от частных к более общим системам, включающим предшествующий уровень знаний;
- имитационно-моделирующий принцип, позволяющий за счет качественного изменения методов исследования повысить эффективность принимаемых организационно-технологических решений;
- интерактивно-графический принцип, используемый для построения и оптимизации моделей сложных систем, создания нормативной базы, учета многовариантности технологий, различных критериев и ограничений;
- инженерно-экономический принцип, применяемый при оценке прогрессивности решений.

Теория и методология оценки принимаемых решений при формировании «зеленой» инфраструктуры городской среды предполагают группу оценочных критериев, являющихся индикаторами технической прогрессивности и социальной значимости, обладающих прогнозирующей способностью и взаимосогласованностью, и включают критерии¹⁰:

- адаптивности, предназначенный для оценки способности объекта к преобразованиям в период существования;
- организованности — комплексный критерий, необходимый и достаточный для оценки организованности жизнеобеспечивающих процессов;
- технологичности, характеризующий соответствие совокупности свойств объекта требованиям эксплуатации;
- надежности, позволяющий выделять показатели, оптимально-нормативное значение которых необходимо соблюдать при всех обстоятельствах;
- развертываемости — качественный критерий для оценки принципиально новых решений;
- универсальности, характеризующий широту диапазона возможностей объекта;
- результативности, характеризующий степень реализуемости возможностей объекта;
- управляемости, характеризующий управляемость элементов городского «зеленого» фонда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В перспективе санитарно-гигиенические факторы, включая химическое загрязнение воды, воздуха и почвы, биологическое загрязнение воды и почвы, продолжают оказывать негативное влияние на здоровье населения.

⁹ Об утверждении Методики оценки экологического состояния зеленых насаждений Санкт-Петербурга : Распоряжение Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга от 03.02.2021 № 17-р.

¹⁰ Гусаков А.А. Системотехника строительства. М. : Стройиздат, 1983. 440 с.

При оценке показателя «Озелененные пространства» (0–60 баллов) индекса качества городской среды (0–360 баллов) в группе российских городов с населением свыше 1 млн чел. в динамике 2018–2020 гг. из 15 городов менее половины баллов стабильно получают девять городов — Волгоград, Воронеж, Екатеринбург, Красноярск, Новосибирск, Омск, Ростов-на-Дону, Самара и Челябинск.

Ретроспективный анализ соотношения общей площади зеленых насаждений к общей площади городских земель в пределах городской черты в Санкт-Петербурге показывает положительную динамику — 1–2 %; для городских жителей актуальными остаются проблемы состояния газонов, нехватки или запущенного состояния зеленых насаждений, отсутствия или недостаточного количества скверов, парков и зон отдыха. При оценке показателя «Озелененные пространства» индекса качества городской среды в период с 2018 по 2020 гг. город получает соответственно 44, 45, 41 балл.

С ускорением темпов урбанизации растет потребность в устойчивом городском планировании. Существующие подходы к зонированию городских территорий, основанные на функциональном назначении районов, не решают проблему их озеленения. Требуется дальнейшее совершенствование законодательной и нормативной базы на федеральном и региональном уровнях.

На качество зеленых насаждений существенное влияние оказывают управленческие решения и своевременность их реализации, тенденции в развитии города, погодные условия, распространение и развитие болезней и вредителей растений. Сохранение

благоприятной городской среды, изменения законодательства в области городского озеленения, меняющиеся условия произрастания зеленых насаждений на территории города определяют потребность проведения оценки экологического состояния зеленых насаждений по установленным нормативам их качества.

При формировании «зеленого» каркаса города необходимо учитывать состояние всех его элементов, включая зеленые насаждения придомовых территорий в жилых кварталах. В Санкт-Петербурге отсутствует методика оценки качества озеленения придомовых территорий многоквартирных домов.

Своевременная оценка градостроительной деятельности в населенном пункте и в окружающих его окрестностях имеет большое значение. Так, например, перемещение производственных мощностей за городскую черту и реновация освобожденных промышленных территорий может не дать желаемого результата в случае массивной застройки на границе города и области жилыми кварталами с низкой степенью благоустройства деревьями, кустарниками, газонами, а также при сохранении существующего транспортного трафика.

Предлагается осуществлять организацию проектирования городской «зеленой» системы в две стадии, различая пять групп проблем. На обсуждение выносятся концептуальные принципы и группа оценочных критериев, составляющих методологическую основу создания «зеленого» каркаса населенного пункта. Элементы технологии «зеленой» инфраструктуры городской среды планируется рассмотреть в следующей статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Осипов В.И.* Биосферный подход к оценке экологической безопасности (доклад на пленарном заседании первой конференции «Лаверовские чтения», февраль 2017 г.) // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология*. 2017. № 4. С. 3–12.
2. *Осипов В.И.* Адаптационный принцип природопользования // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология*. 2017. № 5. С. 3–12.
3. *Ильичев В.А., Емельянов С.Г., Колчунов В.И., Бакаева Н.В., Кобелева С.А.* Моделирование и анализ закономерностей динамики изменения состояния биосферосовместимых урбанизированных территорий // *Жилищное строительство*. 2015. № 3. С. 3–9.
4. *Ilyichev V., Emelyanov S., Kolchunov V., Bakayeva N.* About the dynamic model formation of the urban livelihood system compatible with the biosphere // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 725–726. Pp. 1224–1230. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.725-726.1224
5. *Badiu D.L., Ioja C.I., Patroescu M., Breuste J., Artmann M., Nita M.R. et al.* Is urban green space per capita a valuable target to achieve cities' sustainability goals? Romania as a case study // *Ecological Indicators*. 2016. Vol. 70. Pp. 53–66. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.05.044
6. *Zhao Y., Xiao G., Zhou J., Wu Ch.* International Comparison of the Patterns in Urban Transition towards Greening // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 198. Pp. 770–780. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.07.128
7. *Теличенко В.И., Слесарев М.Ю.* «Зеленая» стандартизация будущего — фактор экологической безопасности среды жизнедеятельности // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 8. С. 90–97.
8. *Теличенко В.И., Бенуж А.А., Сухинина Е.А.* Межгосударственные «зеленые» стандарты для формирования экологически безопасной среды жизнедеятельности // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. № 4. С. 438–462. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.438-462

9. Теличенко В.И. «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности: понятия, термины, стандарты // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 4 (103). С. 364–372. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.364-372
10. Теличенко В.И., Слесарев М.Ю. «Зеленая» стандартизация технологий формирования природоподобной среды жизнедеятельности // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 5 (116). С. 558–567. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.558-567
11. Бойценюк Л.И., Груздев В.С., Суслов С.В., Хрусталева М.А. Сохранение биоразнообразия — основа устойчивого природопользования лесных ландшафтов // Экология урбанизированных территорий. 2021. № 1. С. 12–17. DOI: 10.24412/1816-1863-2021-1-12-17
12. Гусейнов А.Н., Роберт А.Э., Слащева А.В. Красная книга почв особо охраняемых природных территорий в мегаполисе // Экология урбанизированных территорий. 2020. № 1. С. 42–48. DOI: 10.24411/1816-1863-2020-11042
13. Gao Zh., Song K., Pan Y., Malkinson D., Zhang X., Jia B. et al. Drivers of spontaneous plant richness patterns in urban green space within a biodiversity hotspot // Urban Forestry & Urban Greening. 2021. Vol. 61. P. 127098. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127098
14. Захаров К.В. Охрана природы в Москве и ее результативность // Экология урбанизированных территорий. 2019. № 1. С. 55–62. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-11055
15. Кривоногова А.С. Ретроспектива управления городским благоустройством и постройками в Санкт-Петербурге в начале XX века // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2009. № 186. С. 219–228.
16. Lopucki R., Kiersztyn A. Urban green space conservation and management based on biodiversity of terrestrial fauna — a decision support tool // Urban Forestry & Urban Greening. 2015. Vol. 14. Issue 3. Pp. 508–518. DOI: 10.1016/j.ufug.2015.05.001
17. Teixeira C.P., Fernandes C.O., Ahern J., Honrado J.P., Farinha-Marques P. Urban ecological novelty assessment: Implications for urban green infrastructure planning and management // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 773. P. 145121. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145121
18. Вагизов М.Р., Навалихин С.В., Баенгуев Б.А. Разработка геоинформационной системы благоустройства зеленых насаждений общего пользования г. Санкт-Петербурга // Фундаментальные исследования. 2017. № 11. С. 35–40.
19. Любарская М.А., Чекалин В.С., Бачуринская И.А. Учет влияния экологического следа в системе управления инфраструктурой городского хозяйства // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 10. С. 1461–1472. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1461-1472
20. Ergen M. Using geographical information systems to measure accessibility of green areas in the urban center of Nevşehir, Turkey // Urban Forestry & Urban Greening. 2021. Vol. 62. P. 127160. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127160
21. Данилина Н.В., Власов Д.Н. «Здоровый» город как базовая концепция территориального развития // Экология урбанизированных территорий. 2020. № 2. С. 112–119. DOI: 10.24411/1816-1863-2020-12112
22. Беляева Л.Н., Карандеев А.Ю., Климов Д.С., Кочуров Б.И. Ландшафты малых городов и оценка их благоустройства // Экология урбанизированных территорий. 2020. № 4. С. 126–137. DOI: 10.24412/1816-1863-2020-4-126-137
23. Слепнев М.А., Золотайкина И.А. Обеспечение сбалансированного развития природной территории на примере Бирюлевского дендрария в Москве // Экология урбанизированных территорий. 2021. № 1. С. 60–67. DOI: 10.24412/1816-1863-2021-1-60-67
24. Самойлова Н.А., Грибков А.А. Градостроительная трансформация территории с учетом видеоэкологических факторов // Экология урбанизированных территорий. 2020. № 1. С. 83–92. DOI: 10.24411/1816-1863-2020-11083
25. Бочарникова А.В., Донченко В.К., Калинина И.К. Тенденция развития системы охраняемых природных территорий в приграничном регионе на примере РФ, Финляндии и Эстонии // Региональная экология. 2018. № 3 (53). С. 125–136. DOI: 10.30694/1026-5600-2018-3-125-136
26. Zhang S., Ramirez F.M. Assessing and mapping ecosystem services to support urban green infrastructure: the case of Barcelona, Spain // Cities. 2019. Vol. 92. Pp. 59–70. DOI: 10.1016/j.cities.2019.03.016
27. Daniels B., Zaunbrecher B.S., Paas B., Ottermanns R., Ziefle M., Rob-Nickoll M. Assessment of urban green space structures and their quality from a multidimensional perspective // Science of The Total Environment. 2018. Vol. 615. Pp. 1364–1378. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.167
28. Сергеева Н.Д., Цыганков В.В., Абраменков С.А. Научные основы организационно-технологического проектирования строительства объектов примагистрального озеленения // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2018. № 3 (23). С. 3–12.
29. Gál T., Mahó S.I., Skarbit N., Unger J. Numerical modelling for analysis of the effect of different urban green spaces on urban heat load patterns in the present and in the future // Computers, Environment and Urban Systems. 2021. Vol. 87. P. 101600. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2021.101600
30. Gavrilidis A.A., Nita M.R., Onose D.A., Badiu D.L., Nastase I.I. Methodological framework for urban sprawl control through sustainable planning of urban green infrastructure // Ecological Indicators. 2019. Vol. 96. Pp. 67–78. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.10.054

31. *Lindholm A.Ch., Caspersen O.Hj., Konijnendijk van den Bosch C.C.* Methods for mapping recreational and social values in urban green spaces in the nordic countries and their comparative merits for urban planning // *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*. 2015. Vol. 12. Pp. 71–81. DOI: 10.1016/j.jort.2015.11.007
32. *Ильичев В.А., Колчунов В.И., Бакаева Н.В.* Принципы стратегического планирования развития территорий (на примере федеральной земли Бавария) // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 2. С. 158–168. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.158-168
33. *Boualem El Kechebour.* Modelling of assessment of the green space in the urban composition // *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. 2015. Vol. 195. Pp. 2326–2335. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.06.187
34. *Остякова А.В., Плюснина Е.В.* Благоустройство парковых комплексов городских агломераций // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 2. С. 294–306. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.294-306
35. *Campbell-Arvai V., Lindquist M.* From the ground up: using structured community engagement to identify objectives for urban green infrastructure planning // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2021. Vol. 59. P. 127013. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127013
36. *Меркулова С.В., Кочуров Б.И., Меркулов П.И., Ивашкина И.В.* Озеленение как фактор улучшения экологической обстановки урбанизированных территорий (на примере города Саранска) // *Экология урбанизированных территорий*. 2018. № 3. С. 13–18. DOI: 10.24411/1816-1863-2018-13013
37. *Глинянова И.Ю., Городничая А.Н., Азаров В.Н., Фомичев В.Т., Мельченко А.И.* Совершенство системы экологической безопасности городской среды: практический опыт использования фитомодулярного показателя // *Экология урбанизированных территорий*. 2019. № 1. С. 6–10. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-11006
38. *Садковская О.Е.* Регулирующие линии природно-экологического каркаса градостроительных систем Ростовской области // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2020. № 1. С. 119–134. DOI: 10.21869/2311-1518-2020-29-1-119-134
39. *Giannico V., Spano G., Elia M., D'Este M., Sanesi G., Laforteza R.* Green spaces, quality of life, and citizen perception in European cities // *Environmental Research*. 2021. Vol. 196. P. 110922. DOI: 10.1016/j.envres.2021.110922
40. *Kremer P., Hamstead Z.A., McPhearson T.* The value of urban ecosystem services in New York City: a spatially explicit multicriteria analysis of landscape scale valuation scenarios // *Environmental Science & Policy*. 2016. Vol. 62. Pp. 57–68. DOI: 10.1016/j.envsci.2016.04.012
41. *Балакин В.В., Сидоренко В.Ф., Слесарев М.Ю., Антюфеев А.В.* Формирование средозащитных объектов озеленения в градоэкологических системах // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 8. С. 1004–1022. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1004-1022
42. *Князев Д.К.* Экологическое обоснование формирования системы озеленения крупного города // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 8 (119). С. 973–983. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.8.973-983
43. *Король Е.А., Шушунова Н.С.* Организационно-технологическое моделирование процессов устройства кровельных покрытий с модульной системой озеленения // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 2. С. 250–261. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.250-261
44. *Hoeben D.A., Posch A.* Green roof ecosystem services in various urban development types: A case study in Graz, Austria // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2021. Vol. 62. P. 127167. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127167
45. *Mesimäki M., Hauru K., Kotze D.J., Lehvävirta S.* Neo-spaces for urban livability? Urbanites' versatile mental images of green roofs in the Helsinki metropolitan area, Finland // *Land Use Policy*. 2017. Vol. 61. Pp. 587–600. DOI: 10.1016/j.landusepol.2016.11.021
46. *Sakieh Y., Jaafari Sh., Ahmadi M., Danekar A.* Green and calm: modeling the relationships between noise pollution propagation and spatial patterns of urban structures and green covers // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2017. Vol. 24. Pp. 195–211. DOI: 10.1016/j.ufug.2017.04.008
47. *Глинянова И.Ю., Азаров В.Н.* Экологическая безопасность жилых и общественно-деловых зон с позиции мониторинга PM2.5, PM10 на листьях абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 4. С. 533–552. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.533-552
48. *Фан Тхи Ан, Шукуров И.С., Фам Ван Лыонг, Шукурова Л.И.* Исследование запыленности воздуха городской среды // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 10. С. 1425–1439. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1425-1439
49. *Chen W.Y.* The role of urban green infrastructure in offsetting carbon emissions in 35 major Chinese cities: a nationwide estimate // *Cities*. 2015. Vol. 44. Pp. 112–120. DOI: 10.1016/j.cities.2015.01.005
50. *Абрамов А.В., Пчеленок О.А., Козлова Н.М., Родичева М.В.* О влиянии озеленения городской среды на миграцию тяжелых металлов в системе «литосфера – биостром – атмосфера» // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2020. № 2. С. 124–132. DOI: 10.21869/2311-1518-2020-30-2-124-132
51. *Потапова Е.В., Красавцева М.С., Безбородова Ю.В., Макаров А.А.* Зоны с особыми условиями использования и озелененные территории городов // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2021. № 1 (33). С. 63–76. DOI: 10.21869/2311-1518-2021-33-1-63-76
52. *Графкина М.В., Азаров А.В., Добринский Д.Р., Николенко Д.А.* К вопросу контроля и нор-

мирования выбросов мелкодисперсной пыли в атмосферный воздух при движении автомобильного транспорта // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 4 (103). С. 373–380. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.373-380

53. Князев Д.К. Экологические риски от автомобильного транспорта в городе-миллионнике // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 10. С. 1299–1308. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1299-1308

54. Бакаева Н.В., Пилупенко О.В., Гармонов К.В. Практические рекомендации по повышению экологической безопасности автозаправочных станций в черте городской застройки // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2018. № 4. С. 84–94.

55. Mathey J., Hennersdorf J., Lehmann I., Wende W. Qualifying the urban structure type approach for urban green space analysis — A case study of Dresden, Germany // Ecological Indicators. 2021. Vol. 125. P. 107519. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107519

56. Navarrete-Hernandez P., Laffan R. A greener urban environment: Designing green infrastructure interventions to promote citizens' subjective wellbeing // Landscape and Urban Planning. 2019. Vol. 191. P. 103618. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2019.103618

57. Ossola A., Locke D., Lin B., Minor E. Greening in style: urban form, architecture and the structure of front and backyard vegetation // Urban Forestry & Urban Greening. 2019. Vol. 185. Pp. 141–157. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2019.02.014

58. Radhakrishnan M., Kenzhegulova I., Elofjy M.G., Ibrahim W.A., Zevenbergen C., Pathirana A. Development of context specific sustainability criteria for selection of plant species for green urban infrastructure: the case of Singapore // Sustainable Production and Consumption. 2019. Vol. 20. Pp. 316–325. DOI: 10.1016/j.spc.2019.08.004

59. Бакаева Н.В., Чайковская Л.В., Кормина А.А. Градоустройство как комплексная деятельность по созданию социально-ориентированной городской среды // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2019. № 1. С. 94–106. DOI: 10.21869/23-11-1518-2019-25-1-94-106

60. Elsadek M., Liu B., Xie J. Window view and relaxation: viewing green space from a high-rise estate improves urban dwellers' wellbeing // Urban Forestry & Urban Greening. 2020. Vol. 55. P. 126846. DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126846

61. Kabisch N., Püffel C., Masztalerz O., Hemmerling J., Kraemer R. Physiological and psychological effects of visits to different urban green and street environments in older people: a field experiment in a dense inner-city area // Landscape and Urban Planning. 2020. Vol. 207. P. 103998. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2020.103998

62. Ring Z., Damyanovic D., Reinwald F. Green and open space factor Vienna: a steering and evaluation tool for urban green infrastructure // Urban Forestry & Urban

Greening. 2021. Vol. 62. P. 127131. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127131

63. Дьячкова О.Н. Влияние состояния природных компонентов городской среды на здоровье населения // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования: сб. докл. Первой национальной конф. 2020. С. 449–554.

64. Coppel G., Wüstemann H. The impact of urban green space on health in Berlin, Germany: empirical findings and implications for urban planning // Landscape and Urban Planning. 2017. Vol. 167. Pp. 410–418. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.06.015

65. Crouse D.L., Pinault L., Balram A., Hystad P., Peters P.A., Chen H. et al. Urban greenness and mortality in Canada's largest cities: a national cohort study // The Lancet Planetary Health. 2017. Vol. 1. Issue 7. Pp. e289–e297. DOI: 10.1016/S2542-5196(17)30118-3

66. Huanchun H., Hailin Y., Chen Y., Chen T., Bai L., Peng Zh-R. Urban green space optimization based on a climate health risk appraisal — a case study of Beijing city, China // Urban Forestry & Urban Greening. 2021. Vol. 62. P. 127154. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127154

67. Ле Минь Туан, Шукуров И.С., Гельманова М.О., Слесарев М.Ю. Расчет интенсивности теплового острова в мегаполисах с помощью моделирования в программе ENVI-met // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 9. С. 1262–1273. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1262-1273

68. Трубицына Н.А. Ветровая защита и биоклиматический комфорт в ландшафтной архитектуре // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 6 (105). С. 619–630. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.6.619-630

69. Жоголева О.А., Гиясов Б.И., Матвеева И.В., Федорова О.О. Статистический метод расчета шума, возникающего в квартирах от внутриквартирных источников звука, и его экспериментальная проверка // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 4 (103). С. 381–389. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.381-389

70. Ле Минь Туан, Шукуров И.С. Моделирование тепло-ветрового режима городской улицы в г. Ханое // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 3. С. 368–379. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.368-379

71. Смагин А.В., Григорьева И.Ю., Саркисов Г.А. Влияние углеводородного загрязнения на влажностные характеристики дисперсных грунтов и рост травянистой растительности // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2016. № 6. С. 521–530.

72. Проценко Е.П., Гридасова О.В., Пученкова А.В., Саад Фархунд Сабр, Балабина Н.А. Изменения фонового содержания тяжелых металлов в растительных сообществах в многолетнем цикле // Экология урбанизированных территорий. 2020. № 1. С. 6–14. DOI: 10.24411/1816-1863-2020-11006

73. Бакина Л.Г., Груздев В.Н., Дроздова И.В., Шилин Б.В. Дистанционное обнаружение стресса растительности на ранних стадиях антропогенного

воздействия тяжелыми металлами // Региональная экология. 2016. № 1 (43). С. 76–89.

74. *Haaland Ch., Konijnendijk van den Bosch C.* Challenges and strategies for urban green-space planning in cities undergoing densification: a review // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2015. Vol. 14. Issue 4. Pp. 760–771. DOI: 10.1016/j.ufug.2015.07.009

75. *Watts G.* The effects of “greening” urban areas on the perceptions of tranquility // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2017. Vol. 26. Pp. 11–17. DOI: 10.1016/j.ufug.2017.05.010

76. *Kabisch N.* Ecosystem service implementation and governance challenges in urban green space planning — the case of Berlin, Germany // *Land Use Policy*. 2015. Vol. 42. Pp. 557–567. DOI: 10.1016/j.landusepol.2014.09.005

77. *Thierfelder H., Kabisch N.* Viewpoint Berlin: Strategic urban development in Berlin — challenges for future urban green space development // *Environmental Science & Policy*. 2016. Vol. 62. Pp. 120–122. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.09.004

78. *Борисов М.В., Бакаева Н.В., Черняева И.В.* Нормативно-техническое регулирование в области озеленения городской среды // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 2. С. 212–222. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.212-222

79. *Anguluri R., Narayanan P.* Role of green space in urban planning: Outlook towards smart cities // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2017. Vol. 25. Pp. 58–65. DOI: 10.1016/j.ufug.2017.04.007

80. *Ершова С.А., Шишелова С.А., Орловская Т.Н.* Экономические и правовые аспекты оценки эффективности градостроительных преобразований территории // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 9. С. 1308–1320. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1308-1320

81. *Евсеева А.А., Петровская Т.К., Суслова Э.Ю.* Проблемы правового регулирования зеленого фонда урбанизированных территорий // *Экология урбанизированных территорий*. 2020. № 3. С. 115–120. DOI: 10.24411/1816-1863-2020-13115

82. *Беляева Е.Л.* «Сохранение» и «обеспечение сохранности» при проектировании благоустройства и озеленения центров исторических городов // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2019. № 3. С. 54–70. DOI: 10.21869/23-11-1518-2019-27-3-54-70

83. *Каракова Т.В.* Противостояние идеи «Умного города» и бытовой урбанизации // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2020. № 3. С. 30–35. DOI: 10.21869/2311-1518-2020-31-3-30-35

84. *Dennis M., James Ph.* Considerations in the valuation of urban green space: Accounting for user participation // *Ecosystem Services*. 2016. Vol. 21. Pp. 120–129. DOI: 10.1016/j.ecoser.2016.08.003

85. *Seiferling I., Naik N., Ratti C., Proulx R.* Green streets — quantifying and mapping urban trees with street-level imagery and computer vision // *Landscape and Urban Planning*. 2017. Vol. 165. Pp. 93–101. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.05.010

86. *Wüstemann H., Kalisch D., Kolbe J.* Access to urban green space and environmental inequalities in Germany // *Landscape and Urban Planning*. 2017. Vol. 164. Pp. 124–131. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.04.002

87. *Kabisch N., Qureshi S., Haase D.* Human-environment interactions in urban green spaces — a systematic review of contemporary issues and prospects for future research // *Environmental Impact Assessment Review*. 2015. Vol. 50. Pp. 25–34. DOI: 10.1016/j.eiar.2014.08.007

88. *Wolff M., Scheuer S., Haase D.* Looking beyond boundaries: revisiting the rural-urban interface of green space accessibility in Europe // *Ecological Indicators*. 2020. Vol. 113. P. 106245. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106245

89. *Nesbitt L., Meitner M.J., Girling C., Sheppard S.R.J.* Urban green equity on the ground: practice-based models of urban green equity in three multicultural cities // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2019. Vol. 44. P. 126433. DOI: 10.1016/j.ufug.2019.126433

90. *Sánchez F.G., Solecki W.D., Batalla C.R.* Climate change adaptation in Europe and the United States: A comparative approach to urban green spaces in Bilbao and New York City // *Land Use Policy*. 2018. Vol. 79. Pp. 164–173. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.08.010

91. *Дьячкова О.Н.* Влияние загрязнения почвы на экологическую безопасность городской среды Санкт-Петербурга // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2020. № 1. С. 67–71. DOI: 10.31857/S0869780920010044

92. *Дьячкова О.Н.* Система контролирующих параметров рационального использования водных ресурсов // *Яковлевские чтения: сб. док. XVI Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти академика РАН С.В. Яковлева*. 2021. С. 75–83.

93. *Zhu X., Gao M., Zhang R., Zhang B.* Quantifying emotional differences in urban green spaces extracted from photos on social networking sites: A study of 34 parks in three cities in northern China // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2021. Vol. 62. P. 127133. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127133

Поступила в редакцию 30 мая 2021 г.

Принята в доработанном виде 20 июля 2021 г.

Одобрена для публикации 29 июля 2021 г.

О Б АВТОРЕ: **Ольга Николаевна Дьячкова** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии строительного производства; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4; SPIN-код: 7630-8646; dyachkova_on@mail.ru.

REFERENCES

- Osipov V.I. Biosphere approach to the ecological safety assessment (report at the plenary session of the first conference in commemoration of academician N.P. Laverov, february 2017). *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2017; 4:3-12. (rus.).
- Osipov V.I. The adaptive principle of nature management. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2017; 5:3-12. (rus.).
- Ilyichev V.A., Emelyanov S.G., Kolchunov V.I., Bakayeva N.V., Kobeleva S.A. Modeling and analyzing of the regularities the dynamics state change of biosphere compatible urban areas. *Housing Construction*. 2015; 3:3-9 (rus.).
- Ilyichev V., Emelyanov S., Kolchunov V., Bakaeva N. About the dynamic model formation of the urban livelihood system compatible with the biosphere. *Applied Mechanics and Materials*. 2015; 725-726:1224-1230. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.725-726.1224
- Badiu D.L., Ioja C.I., Patroescu M., Breuste J., Artmann M., Nita M.R. et al. Is urban green space per capita a valuable target to achieve cities' sustainability goals? Romania as a case study. *Ecological Indicators*. 2016; 70:53-66. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.05.044
- Zhao Y., Xiao G., Zhou J., Wu Ch. International Comparison of the Patterns in Urban Transition towards Greening. *Procedia Engineering*. 2017; 198:770-780. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.07.128
- Telichenko V.I., Slesarev M.Yu. "Green" Standardization of the future is the factor of environmental safety of the environment of lifetime. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 8:90-97. (rus.).
- Telichenko V.I., Benuzh A.A., Suhinina E.A. Interstate green standards of formation sustainable built environment vital activity. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(4):438-462. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.438-462 (rus.).
- Telichenko V.I. Green technologies of living environment: concepts, terms, standards. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017; 12:4:(103):364-372. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.364-372 (rus.).
- Telichenko V.I., Slesarev M.Yu. "Green" standardization of technologies for forming the nature-friendly living environment. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2018; 13:5(116):558-567. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.558-567 (rus.).
- Boytseyuk L.I., Gruzdev V.S., Suslov S.V., Khrustaleva M.A. Biodiversity conservation as the basis for sustainable forest landscapes management. *Ecology of Urbanized Areas*. 2021; 1:12-17. DOI: 10.24412/1816-1863-2021-1-12-17 (rus.).
- Guseinov A.N., Robert A.E., Slashchova A.V. The Red Data Book of soils of specially protected natural territories in a metropolis. *Ecology of Urbanized Areas*. 2020; 1:42-48. DOI: 10.24411/1816-1863-2020-11042 (rus.).
- Gao Zh., Song K., Pan Y., Malkinson D., Zhang X., Jia B. et al. Drivers of spontaneous plant richness patterns in urban green space within a biodiversity hotspot. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2021; 61:127098. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127098
- Zakharov K.V. Nature protection in Moscow and its efficiency. *Ecology of Urbanized Areas*. 2019; 1:55-62. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-11055 (rus.).
- Krivonogova A.S. Retrospective of management of a municipal improvements and buildings in St.-Petersburg in the beginning of XX century. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii*. 2009; 186:219-228. (rus.).
- Lopucki R., Kiersztyn A. Urban green space conservation and management based on biodiversity of terrestrial fauna — a decision support tool. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2015; 14(3):508-518. DOI: 10.1016/j.ufug.2015.05.001.
- Teixeira C.P., Fernandes C.O., Ahern J., Honrado J.P., Farinha-Marques P. Urban ecological novelty assessment: Implications for urban green infrastructure planning and management. *Science of the Total Environment*. 2021; 773:145121. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145121
- Vagizov M.R., Navalikhin S.V., Baenguev B.A. Development of geoinformation system of green spaces of St. Petersburg. *Fundamental Research*. 2017; 11:35-40. (rus.).
- Liubarskaia M.A., Chekalin V.S., Bachurinskaya I.A. Environmental footprint and its influence in the context of urban economy management. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(10):1461-1472. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1461-1472 (rus.).
- Ergen M. Using geographical information systems to measure accessibility of green areas in the urban center of Nevşehir, Turkey. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2021; 62:127160. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127160

21. Danilina N.V., Vlasov D.N. “Healthy City” as a basic concept for territorial development. *Ecology of Urbanized Areas*. 2020; 2:112-119. DOI: 10.24411/1816-1863-2020-12112 (rus.).
22. Belyaeva L.N., Karandeev A.Y., Klimov D.S., Kochurov B.I. Landscapes of small towns and assessment of their accomplishment. *Ecology of Urbanized Areas*. 2020; 4:126-137. DOI: 10.24412/1816-1863-2020-4-126-137 (rus.).
23. Slepnev M.A., Zolotaykina I.A. Sustainable development of a protected natural area on the example of the Birulevsky dendrarium in the Moscow city. *Ecology of Urbanized Areas*. 2021; 1:60-67. DOI: 10.24412/1816-1863-2021-1-60-67 (rus.).
24. Samoylova N.A., Gribkov A.A. Urban transformation and videoecology factors. *Ecology of Urbanized Areas*. 2020; 1:83-92. DOI: 10.24411/1816-1863-2020-11083 (rus.).
25. Bocharnikova A.V., Donchenko V.K., Kalinina I.K. Development trends of protected areas in a trans-border region: case study of Russia, Finland and Estonia. *Regional Ecology*. 2018; 3(53):125-136. DOI: 10.30694/1026-5600-2018-3-125-136 (rus.).
26. Zhang S., Ramirez F.M. Assessing and mapping ecosystem services to support urban green infrastructure: the case of Barcelona, Spain. *Cities*. 2019; 92:59-70. DOI: 10.1016/j.cities.2019.03.016
27. Daniels B., Zaunbrecher B.S., Paas B., Ottermanns R., Ziefle M., Rob-Nickoll M. Assessment of urban green space structures and their quality from a multidimensional perspective. *Science of The Total Environment*. 2018; 615:1364-1378. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.167
28. Sergeeva N.D., Tsygankov V.V., Abramenkov S.A. The scientific basis of organizational and technological design of construction objects near trunk road greening ecological urban environment. *Biosphere compatibility: human, region, technologies*. 2018; 3(23):3-12. (rus.).
29. Gál T., Mahó S.I., Skarbit N., Unger J. Numerical modelling for analysis of the effect of different urban green spaces on urban heat load patterns in the present and in the future. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2021; 87:101600. DOI: 10.1016/j.compenvurb-sys.2021.101600
30. Gavrilidis A.A., Nita M.R., Onose D.A., Badiu D.L., Nastase I.I. Methodological framework for urban sprawl control through sustainable planning of urban green infrastructure. *Ecological Indicators*. 2019; 96:67-78. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.10.054
31. Lindholm A.Ch., Caspersen O.H., Konijnendijk van den Bosch C.C. Methods for mapping recreational and social values in urban green spaces in the nordic countries and their comparative merits for urban planning. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*. 2015; 12:71-81. DOI: 10.1016/j.jort.2015.11.007
32. Ilyichev V.A., Kolchunov V.I., Bakaeva N.V. Principles of area development strategic planning (the case of the free state of Bavaria). *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2019; 14:2:158-168. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.158-168 (rus.).
33. Boualem El Kechebour. Modelling of assessment of the green space in the urban composition. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 2015; 195:2326-2335. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.06.187
34. Ostyakova A.V., Pluisnina E.V. The landscaping of urban agglomeration park systems. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(2):294-306. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.294-306 (rus.).
35. Campbell-Arvai V., Lindquist M. From the ground up: using structured community engagement to identify objectives for urban green infrastructure planning. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2021; 59:127013. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127013
36. Merkulova S.V., Kochurov B.I., Merkulov P.I., Ivashkina I.V. Gardening as a factor of improving of ecological situation in the urban areas (for example, the city of Saransk). *Ecology of Urbanized Areas*. 2018; 3:13-18. DOI: 10.24411/1816-1863-2018-13013 (rus.).
37. Glinyaynova I.Yu., Gorodnichaya A.N., Azarov V.N., Fomichev V.T., Melchenko A.I. Environmental safety of the urban environment and improving the quality of life of the population. *Ecology of Urbanized Areas*. 2019; 1:6-10. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-11006 (rus.).
38. Sadkovskaya O.E. Borders of natural-ecological framework of urban planning systems of Rostov region. *Biosphere compatibility: human, region, technologies*. 2020; 1:119-134. DOI: 10.21869/2311-1518-2020-29-1-119-134 (rus.).
39. Giannico V., Spano G., Elia M., D’Este M., Sanesi G., Laforteza R. Green spaces, quality of life, and citizen perception in European cities. *Environmental Research*. 2021; 196:110922. DOI: 10.1016/j.envres.2021.110922
40. Kremer P., Hamstead Z.A., McPhearson T. The value of urban ecosystem services in New York City: a spatially explicit multicriteria analysis of landscape scale valuation scenarios. *Environmental Science & Policy*. 2016; 62:57-68. DOI: 10.1016/j.envsci.2016.04.012
41. Balakin V.V., Sidorenko V.F., Slesarev M.Yu., Antyufeev A.V. Formation of environmental protection landscaping facilities in urban ecological systems. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2019; 14(8):1004-1022. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1004-1022 (rus.).
42. Knyazev D.K. Ecological substantiation of formation of the large city planting system. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2018; 13:8(119):973-983. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.8.973-983 (rus.).

43. Korol E.A., Shushunova N.S. Organizational and technological modeling of the processes of the device of roofing coatings with modular system of greening. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14:2:250-261. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.250-261 (rus.).
44. Hoeben D.A., Posch A., Green roof ecosystem services in various urban development types: A case study in Graz, Austria. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2021; 62:127167. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127167
45. Mesimäki M., Hauru K., Kotze D.J., Lehvävirta S. Neo-spaces for urban livability? Urbanites' versatile mental images of green roofs in the Helsinki metropolitan area, Finland. *Land Use Policy*. 2017; 61:587-600. DOI: 10.1016/j.landusepol.2016.11.021
46. Sakieh Y., Jaafari Sh., Ahmadi M., Danekar A. Green and calm: modeling the relationships between noise pollution propagation and spatial patterns of urban structures and green covers. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2017; 24:195-211. DOI: 10.1016/j.ufug.2017.04.008
47. Glinyanova I.Yu., Azarov V.N. Environmental safety of residential and public areas in the context of PM_{2.5}, PM₁₀ monitoring on the leaves of apricot trees (*Prunus armeniaca*). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(4):533-552. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.533-552 (rus.).
48. Phan Thi An, Shukurov I.S., Pham Van Luong, Shukurova L.I. A study of the dust content in the air of the urban environment. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(10):1425-1439. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1425-1439 (rus.).
49. Chen W.Y. The role of urban green infrastructure in offsetting carbon emissions in 35 major Chinese cities: a nationwide estimate. *Cities*. 2015; 44:112-120. DOI: 10.1016/j.cities.2015.01.005
50. Abramov A.V., Pchelenok O.A., Kozlova N.M., Rodicheva M.V. About the influence of gardening on the migration of heavy metals in the system "lithosphere — biostrome — atmosphere" of the city environment. *Biosphere compatibility: human, region, technologies*. 2020; 2:124-132. DOI: 10.21869/2311-1518-2020-30-2-124-132 (rus.).
51. Potapova E.V., Krasavtseva M.S., Bezborodova Y.V., Makarov A.A. Areas with special conditions of use and green areas of cities. *Biosphere compatibility: human, region, technologies*. 2021; 1(33):63-76. DOI: 10.21869/2311-1518-2021-33-1-63-76 (rus.).
52. Grafkina M.V., Azarov A.V., Dobrinsky D.R., Nikolenko D.A. On the issue of control and normalization of fine dust emissions into the atmospheric air during the road transport movement. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12:4(103):373-380. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.373-380 (rus.).
53. Knyazev D.K. Environmental risks from automobile transport in a metropolis. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2019; 14(10):1299-1308. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1299-1308 (rus.).
54. Bakaeva N.V., Pilipenko O.V., Garmonov K.V. Practical recommendations for improving environmental safety filling stations within the city limits. *Biosphere compatibility: human, region, technologies*. 2018; 4:84-94. (rus.).
55. Mathey J., Hennersdorf J., Lehmann I., Wende W. Qualifying the urban structure type approach for urban green space analysis — A case study of Dresden, Germany. *Ecological Indicators*. 2021; 125:107519. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107519
56. Navarrete-Hernandez P., Laffan R. A greener urban environment: Designing green infrastructure interventions to promote citizens' subjective wellbeing. *Landscape and Urban Planning*. 2019; 191:103618. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2019.103618
57. Ossola A., Locke D., Lin B., Minor E. Greening in style: urban form, architecture and the structure of front and backyard vegetation. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2019; 185:141-157. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2019.02.014
58. Radhakrishnan M., Kenzhegulova I., Eloff M.G., Ibrahim W.A., Zevenbergen C., Pathirana A. Development of context specific sustainability criteria for selection of plant species for green urban infrastructure: the case of Singapore. *Sustainable Production and Consumption*. 2019; 20:316-325. DOI: 10.1016/j.spc.2019.08.004
59. Bakaeva N.V., Chaykovskaya L.V., Kormina A.A. The urban planning as a complex activity oriented at the foundation of socially oriented city environment. *Biosphere compatibility: human, region, technologies*. 2019; 1:94-106. DOI: 10.21869/23-11-1518-2019-25-1-94-106 (rus.).
60. Elsadek M., Liu B., Xie J. Window view and relaxation: viewing green space from a high-rise estate improves urban dwellers' wellbeing. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2020; 55:126846. DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126846
61. Kabisch N., Püffel C., Masztalerz O., Hemmerling J., Kraemer R. Physiological and psychological effects of visits to different urban green and street environments in older people: a field experiment in a dense inner-city area. *Landscape and Urban Planning*. 2020; 207:103998. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2020.103998
62. Ring Z., Damjanovic D., Reinwald F. Green and open space factor Vienna: a steering and evaluation tool for urban green infrastructure. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2021; 62:127131. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127131
63. D'yachkova O.N. Influence of the state of natural components of the urban environment on public health. *Actual problems of the construction industry and*

education: a collection of reports from the First National Conference. 2020; 449-554. (rus.).

64. Coppel G., Wüstemann H. The impact of urban green space on health in Berlin, Germany: empirical findings and implications for urban planning. *Landscape and Urban Planning*. 2017; 167:410-418. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.06.015

65. Crouse D.L., Pinault L., Balram A., Hystad P., Peters P.A., Chen H. et al. Urban greenness and mortality in Canada's largest cities: a national cohort study. *The Lancet Planetary Health*. 2017; 1(7):e289-e297. DOI: 10.1016/S2542-5196(17)30118-3

66. Huanchun H., Hailin Y., Chen Y., Chen T., Bai L., Peng Zh-R. Urban green space optimization based on a climate health risk appraisal — a case study of Beijing city, China. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2021; 62:127154. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127154

67. Le Minh Tuan, Shukurov I.S., Gelmanova M.O., Slesarev M.Yu. Using ENVI-met simulation to analyze heat island intensity in megalopolises. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(9):1262-1273. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1262-1273 (rus.).

68. Trubitsyna N.A. Wind Protection of Landscape Architecture. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017; 12(6):(105):619-630. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.6.619-630 (rus.).

69. Zhogoleva O.A., Giyasov B.I., Matveyeva I.V., Fedorova O.O. Statistical method of apartment noise level calculation and its experimental validation. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017; 12:4(103):381-389. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.381-389 (rus.).

70. Le Minh Tuan, Shukurov I.S. Computational fluid dynamics analysis for thermal-wind environment simulation of urban street in Hanoi city. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(3):368-379. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.368-379 (rus.).

71. Smagin A.V., Grigor'eva I. Yu., Sarkisov G.A. Impact of hydrocarbon pollution on moisture characteristics of fine-grained soils and on the grass growth. *Geoekologiya. Inzheneraya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2016; 6:521-530. (rus.).

72. Protsenko E.P., Gridasova O.V., Puchenkova A.V., Saad Farhud Sabr, Balabina N.A. The changes of the heavy metals background content in vegetation communities in perennial circle. *Ecology of Urbanized Areas*. 2020; 1: 6-14. DOI: 10.24411/1816-1863-2020-11006 (rus.).

73. Bakina L.G., Gruzdev V.N., Drozdova I.V., Shilin B.V. Remote detection of human-induced stress on vegetation in the early stages of exposure to heavy metals. *Regional Ecology*. 2016; 1(43):76-89. (rus.).

74. Haaland Ch., Konijnendijk van den Bosch C. Challenges and strategies for urban green-space plan-

ning in cities undergoing densification: a review. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2015; 14(4):760-771. DOI: 10.1016/j.ufug.2015.07.009

75. Watts G. The effects of “greening” urban areas on the perceptions of tranquility. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2017; 26:11-17. DOI: 10.1016/j.ufug.2017.05.010

76. Kabisch N. Ecosystem service implementation and governance challenges in urban green space planning — the case of Berlin, Germany. *Land Use Policy*. 2015; 42:557-567. DOI: 10.1016/j.landusepol.2014.09.005

77. Thierfelder H., Kabisch N. Viewpoint Berlin: Strategic urban development in Berlin — challenges for future urban green space development. *Environmental Science & Policy*. 2016; 62:120-122. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.09.004

78. Borisov M.V., Bakaeva N.V., Chernyaeva I.V. Normative and technical regulation in the field of urban green space arrangement. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(2):212-222. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.212-222 (rus.).

79. Anguluri R., Narayanan P. Role of green space in urban planning: Outlook towards smart cities. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2017; 25:58-65. DOI: 10.1016/j.ufug.2017.04.007

80. Ershova S.A., Shishelova S.A., Orlovskaya T.N. Efficiency assessment of urban planning transformations: economic and legal aspects. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(9):1308-1320. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1308-1320 (rus.).

81. Evseeva A.A., Petrovskaya T.K., Suslova E.Yu. Problems of legislative regulation of the urban green territories. *Ecology of Urbanized Areas*. 2020; 3:115-120. DOI: 10.24411/1816-1863-2020-13115 (rus.).

82. Belyaeva E.L. “Preservation” and “ensuring preservation” in the design of improvement and greening of centers of historical cities. *Biosphere compatibility: human, region, technologies*. 2019; 3:54-70. DOI: 10.21869/23-11-1518-2019-27-3-54-70 (rus.).

83. Karakova T.V. Opposition to the idea of a “Smart city” and household urbanization. *Biosphere compatibility: human, region, technologies*. 2020; 3:30-35. DOI: 10.21869/2311-1518-2020-31-3-30-35 (rus.).

84. Dennis M., James Ph. Considerations in the valuation of urban green space: Accounting for user participation. *Ecosystem Services*. 2016; 21:120-129. DOI: 10.1016/j.ecoser.2016.08.003

85. Seiferling I., Naik N., Ratti C., Proulx R. Green streets — quantifying and mapping urban trees with street-level imagery and computer vision. *Landscape and Urban Planning*. 2017; 165:93-101. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.05.010

86. Wüstemann H., Kalisch D., Kolbe J. Access to urban green space and environmental inequalities in Ger-

many. *Landscape and Urban Planning*. 2017; 164:124-131. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.04.002

87. Kabisch N., Qureshi S., Haase D. Human-environment interactions in urban green spaces — a systematic review of contemporary issues and prospects for future research. *Environmental Impact Assessment Review*. 2015; 50:25-34. DOI: 10.1016/j.eiar.2014.08.007

88. Wolff M., Scheuer S., Haase D. Looking beyond boundaries: revisiting the rural-urban interface of green space accessibility in Europe. *Ecological Indicators*. 2020; 113:106245. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106245

89. Nesbitt L., Meitner M.J., Girling C., Shepard S.R.J. Urban green equity on the ground: practice-based models of urban green equity in three multicultural cities. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2019; 44:126433. DOI: 10.1016/j.ufug.2019.126433

90. Sanchez F.G., Solecki W.D., Batalla C.R. Climate change adaptation in Europe and the United States: A comparative approach to urban green spaces in Bilbao

and New York City. *Land Use Policy*. 2018; 79:164-173. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.08.010

91. D'yachkova O.N. Influence of soil contamination on ecological safety of St. Petersburg urban environment. *Geoekologiya. Inzheneraya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2020; 1:67-71. DOI: 10.31857/S0869780920010044 (rus.).

92. D'yachkova O.N. System of control parameters for the rational use of water resources. *Yakovlev's Readings: a collection of reports of the XVI International Scientific and Technical Conference dedicated to the memory of Academician S.V. Yakovleva*. 2021; 75-83. (rus.).

93. Zhu X., Gao M., Zhang R., Zhang B. Quantifying emotional differences in urban green spaces extracted from photos on social networking sites: A study of 34 parks in three cities in northern China. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2021; 62:127133. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127133

Received May 30, 2021.

Adopted in revised form on July 20, 2021.

Approved for publication on July 29, 2021.

BIONOTES: **Olga N. D'yachkova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Technology; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation, 190005; SPIN-code: 7630-8646; dyachkova_on@mail.ru.

Runoff irrigation practices and challenges in western lowlands of Eritrea

Anghesom A. Ghebrehiwot^{1,2}, Dmitry V. Kozlov²

¹ *Hamelmal 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 arid and semi-desert lowland agro-ecological zones of Eritrea experience low precipitation, much lower than the requirements for robust agricultural production unless supplemented by properly functioning runoff irrigation systems. However, an in-depth understanding of the principles and practices of runoff irrigation, identification of its potentials and challenges and come up with viable solutions is necessary.

Materials and methods. Qualitative and quantitative, descriptive and analytical research methodologies are applied. Primary and secondary data are used to identify existing constraints. Besides, global and regional databases are extensively utilized to fill information gaps.

Results. The total potential cultivable land of Eritrea amounts to 2.1 million ha, out of which 71.4 % is rainfed and 28.6 % is irrigation. But, the potential irrigable land as reported by FAO is much lower (187,500 ha), out of which 50,000 ha is within the Western Lowlands. Considering such disparities and the less likely scenario of lowest irrigation potential, the actual equipped for spate irrigation at national level would amount to only 33.6 %, meaning there are still a lot of possibilities for expansion. The causes of malfunctioning of the existing systems are associated to structural, operation and maintenance, and management. Lack of historical hydrological data is among the highly likely reasons, which in turn greatly affects hydrological simulations.

Conclusions. Despite commendable efforts made to expand the improved runoff irrigation in the Western Lowlands, most of the projects have failed to achieve the intended purposes. Thus, comprehensive and simple mathematical models for making hydrological predictions have been suggested.

KEYWORDS: runoff irrigation, spate hydrology, spate irrigation, water scarcity, water stress, Western Lowlands of Eritrea

FOR CITATION: Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V. Runoff irrigation practices and challenges in western lowlands of Eritrea. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(8):1065-1076. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1065-1076 (rus.).

Орошение аккумулярованными ливневыми водами и проблемы управления водными ресурсами в западных низменностях Эритреи

А.А. Гебрехивот^{1,2}, Д.В. Козлов²

¹ *Сельскохозяйственный колледж Хамельмало, Национальный институт высшего образования и научных исследований; г. Керэн, Государство Эритрея;*

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В пустынных и полупустынных низинных агроэкологических зонах Эритреи выпадает мало осадков, что недостаточно для устойчивого сельскохозяйственного производства, если не использовать технологии орошения. Поэтому необходимы глубокое понимание особенностей и технологии орошения аккумулярованными ливневыми водами, определение возможностей и существующих проблем такого орошения и, в конечном итоге, разработка методологии преодоления этих проблем.

Материалы и методы. Применены качественные и количественные, описательные и аналитические методы исследования. Используются результаты опроса целевой группы лиц, участвовавших в осуществлении гидротехнических проектов по орошению аккумулярованными ливневыми водами; вторичные данные, полученные в результате анализа ведомственной документации; в условиях недостаточного информационного обеспечения общедоступные глобальные и региональные базы данных.

Результаты. Общая площадь пахотных земель Эритреи составляет 2,1 млн га, из которых 71,4 % — богарные, 28,6 % — орошаемые. Площадь потенциально орошаемых земель (по данным ФАО) намного меньше (187 500 га), из которых 50 000 га находятся в Западной низменности. Такие статистические различия характерны и для фактически орошаемых сельхозугодий. Даже если принять во внимание более низкие оценки ирригационного потенциала (187 500 га), фактическая площадь орошаемых земель будет составлять только 33,6 % от общего потенциала оро-

шения. Это указывает на возможности для развития орошаемого земледелия в регионе. Анализ итогов проведенного опроса специалистов водного хозяйства показал наличие ошибочных управленческих решений, эксплуатационных и технических проблем в работе гидротехнических сооружений, связанных в том числе с отсутствием многолетних гидрологических наблюдений, что в значительной мере влияет на результаты гидрологического моделирования.

Выводы. Несмотря на значительные усилия по разработке и внедрению ирригационных проектов в Западной низменности, большинство из них не достигли намеченных целей. Предложено использовать массивы данных глобального реанализа климата, комплексные и простые физико-математические модели формирования стока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: орошение аккумулированными ливневыми водами, поливное орошение, водосбор, дефицит воды, водный кризис, Западные низменности Эритреи

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гебрехивот А.А., Козлов Д.В. Runoff irrigation practices and challenges in western lowlands of Eritrea // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 8. С. 1065–1076. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1065-1076

INTRODUCTION

Climate change is likely to affect the availability, quality and quantity of water. The hydrological changes, induced by climate change, produce more challenges to the sustainable management of water resources. Much of the impacts of climate change have already been manifested in the tropical zones (e.g., sub-Saharan Africa) [1]. In sub-Saharan Africa, water resources are subjected to high hydro-climatic variability over space and time, and are a key constraint on the region's continued economic development. Countries in this region are environmentally and socio-economically vulnerable to disasters and climate change, and many of them are expected to experience increasing water shortages and desertification in the future^{1, 2}. Conspicuously, food security, health, economy, energy, and ecosystems are all water-dependent and thus vulnerable to the impacts of climate change. The impacts of climate change on sub-Saharan Africa's water resources thereupon food security and human health are already acute [2, 3]. Therefore, climate change adaptation and mitigation through water management is critical to sustainable development, and essential to achieving the 2030 Agenda for Sustainable Development, the Paris Agreement on Climate Change and the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction.

Agriculture is the leading consumer of water and mainstay of economic growth in many sub-Saharan African countries. More than 60 % of the labor forces are involved in agriculture related activities. But, agricultural production and the economy of Africa largely depend on sparse and unreliable seasonal rainfall. Most countries in the region face a combination of high hydrological variability, a lack of investment in water infrastructure and weak water governance³. There are

several terms that are used to indicate the level of water availability, such as water scarcity, water stress, water depletion, inter-annual and seasonal variability, groundwater level decline, drought, etc. Among them, water stress and water scarcity are given more emphasis in this discussion.

Water scarcity is a gap between available supply and demand of freshwater in a specified domain, under prevailing institutional arrangements and infrastructural conditions. Causes of water scarcity are many and inexplicably interlinked⁴. The factors that affect the annual available supply of water can be natural or anthropogenic: the natural factors include annual volumes of flow, climatic variability, geological and geomorphological conditions, uneven distribution of water, etc.; anthropogenic factors are water control or storage structures. But, factors affecting water demand are all anthropogenic, such as economic, population growth, urbanization, etc. According to FAO⁵, water scarcity has three dimensions: physical — scarcity in availability of fresh water of acceptable quality with respect to aggregated demand (i.e., physical water shortage); infrastructural (economic) — scarcity due to the lack of adequate infrastructure, irrespective of the level of water resources, due to financial constraints; and institutional — scarcity in access to water services because of the failure of institutions in place to ensure reliable supply of water to users. Water scarcity is signaled by unsatisfied demand, tensions between users, competition for water, over-extraction of groundwater and insufficient flows to the natural environment⁴. The best-known indicator of national water scarcity is done based on the amount of annual total renewable water resources (TRWR) per capita. As such, countries or regions are considered to be facing absolute water scarcity if their TRWR is less than 500 m³ per capita, chronic water shortage if TRWR are between 500 and 1,000 m³ per capita, regular water stress if TRWR between 1,000 and 1,700 m³ per capita, and occasional

¹ The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change. Paris, UNESCO, 2020.

² IPCC. Africa, in Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part B: Regional Aspects: Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2014. Pp. 1199–1266.

³ UN. Sustainable Development Goal 6: Synthesis Report 2018 on Water and Sanitation. New York, USA, 2018.

⁴ FAO. Coping with water scarcity: An action framework for agriculture and food security. *FAO Water Reports*. Rome, Italy, 2012.

⁵ FAO. The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) — Managing systems at risk. Rome and Earthscn, London, 2011.

or local water stress if TRWR is more than 1,700 m³ per capita [4]. On the other hand, water stress measures total annual water withdrawals (municipal, industrial, and agricultural) expressed as a percentage of the total annual available blue water⁶. Higher values indicate more competition among users; hence, less than 10 % or a score of (0–1) is low stress, 10–20 % (1–2) is low to medium stress, 20–40 % (2–3) is medium to high stress, 40–80 % (3–4) is high stress, and greater than 80 % (4–5) extremely high stress.

About 66 % of the African land mass is arid or semi-arid, and more than 300 million of the 800 million people in sub-Saharan Africa (in 2015) lived in absolute or chronic water stress environments; that is, they had less than 1,000 m³ per capita. The reasons mainly stemmed from economic and/or institutional scarcity and to a lesser degree from physical scarcity [5]. While water stress is only 3 % (low stress) in sub-Saharan Africa as compared to world (13 % — low to medium stress), the region has a high prevalence of severe food insecurity (29 %). This is due partly to unevenly distributed water resources that are poorly managed, lack of investment and are affected by conflict and natural hazards, such as droughts and floods³. These situations are further complicated by the drivers of the water crisis (for example, demographic growth, economic development, urbanization, pollution, etc.). The Horn of Africa (Eritrea included), where farming constitutes more than the continental average (over 80 %) of national economies, has been experiencing effects of recurrent climate change evidenced by declining levels of water bodies, unpredictable rainfall patterns, prolonged drought, erratic floods, landslides and changing temperatures [6]. Thus, economies and livelihoods of these nations are facing unprecedented vulnerability to climate change. Lack of sufficient water means there will be community-based conflicts over food and water. In fact, future projections on food and water indicate that this situation will continue to get worse due to increase in demand⁷.

People have always tried to control and store seasonal and irregular water flows in order to have access to water, limit the damages of floods and overcome droughts. Molden and others⁸ proposed three steps to cope up with water scarcity: development, utilization, and reallocation. Firstly, managing the supply can be done by increasing access to conventional and non-conventional water resources, including dam storage,

groundwater withdrawals, harvesting rainwater, reusing wastewater and drainage water, desalination of brackish or salt water, and the use of fossil groundwater. Secondly, water quality deteriorates and aquatic ecosystems are damaged due to reduced water quality and quantity. Thus, water policies focus on improving water management and conservation are necessary. Thirdly, water has become a rare commodity and is no longer sufficient to satisfy the aggregated demand from all sectors. Policies are directed towards the economic optimization of water, with emphasis on reallocation of water from low value to high value uses. The three major water policy domains, where supply enhancement and demand management can be applied, are water, agriculture and national food security⁴.

As noted earlier, Eritrea is located in one of the driest parts of Africa with scarce fresh water resources. The population of Eritrea has been differently reported between 3.41 to more than 5 million. With the assumption of 3.41 million in 2019, the population of Eritrea is projected to be 4.24 million by 2030, 6 million by 2050 and by the end of the century it will be 9.06 million⁹. In 2017, out of the total population, 90 % live in rural areas and the remaining 10 % in urban areas. The long-term average annual precipitation and renewable water resources are 384 mm (45.16 km³ per year) and 7.31 km³ per year, respectively; the annual internal and external renewable water resources represent 2.8 km³ and 4.52 km³, respectively. The annual TRWR is also differently reported between 1,399 m³ per capita and 2143 m³ per capita¹⁰. In both scenarios, TRWR is by far lower than continental and global annual averages whose corresponding values are 3,133 and 5,675 m³ per capita, respectively. According to World Resource Institute (WRI)⁶, Eritrea's water stress score is 3.34 and 3 for 2010 and 2040, respectively. This means that even though some improvement is expected to occur in the future, the water stress level will remain within the range of 40–80 % (that is, high stress) due to increase in demand and other factors. Therefore, the water stress and water scarcity indices demonstrate that Eritrea is literally one of the countries with high or extremely high water vulnerability. Furthermore, Eritrea's geographical location thereupon its climate on one hand, and decades-long war on the other hand, renders it vulnerable to persistent water shortages [7] and food deficits. A recent study on the degree of vulnerability of Eritrea to climate change demonstrated that more than 88 % of the farming households were found to be vulnerable or highly vulnerable to climate change as a result of the combined effect of their exposure to external factors, sensitivity to internal factors, and lower adaptive capacity [8].

⁹ UN. World Population Prospects 2019: Volume II: Demographic Profiles. 2019.

¹⁰ FAO-AQUASTAT. Global Information System on Water and Agriculture: Water resources. 2020.

⁶ Luo T., Young R., Reig P. Aqueduct projected water stress rankings. *Technical note*. 2015.

⁷ IPCC. Climate Change and Land: IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems. *Summary for Policymakers*. 2019.

⁸ Molden D., Sakthivadivel R., Keller J. Hydronomic Zones for Developing Basin Water Conservation Strategies. Research Report No. 56, Colombo, Sri Lanka, 2001.

Over 72 % of the population in Eritrea is engaged in subsistence agriculture. With future increase in population, annual food requirement per person need to be increased. According to FAO10, the total potential arable land in Eritrea is estimated at 1.5 million ha, with nearly 50 % of which is found in the lowlands of arid and semi-desert agro-ecological zones. These two zones receive on average, 200 to 400 mm of rainfall, which is low for agricultural production unless otherwise supplemented by irrigation [9, 10]. Thus, an increased agricultural production can be achieved through improving the existing irrigation systems (for example, pressurized irrigation and runoff irrigation- also known as “spate irrigation”) in the potential irrigable areas. Therefore, the present study aimed at achieving the following objectives: 1) to understand the concepts and practices of runoff irrigation; 2) to explore the development potentials and existing challenges of runoff irrigation in Western Lowland plains of Eritrea; 3) to suggest methodologies that can help to overcome the challenges.

MATERIALS AND METHODS

As has been noted earlier, the study area focused primarily on the runoff irrigation systems established in the Western Lowlands, which can be better described by the topography and climate of Eritrea. The landscape of Eritrea can be broadly classified as the Eastern Lowland, Central Highland, and Western Lowland. The Eastern Lowland with an elevation of 0 to 1500 m above mean sea level (msl) and being part of the Great Rift Valley stretches along the Red Sea for about 800 km with a width of about 30 to 100 km. The Western Lowland with an elevation of 500 to 1,500 m above msl comprises the area that stretches from south to northwards along the Sudan border. The Eastern Lowland and Western Lowland are hot and dry regions, with sparse settlements. The Central Highland represents areas with high altitudes and temperate humid climate with 1500 to 2500 m above msl. It is the most densely populated region in the country. The highest point is EmbaSoira with an elevation of 3018 m above mean sea level (msl) and the lowest point is situated in the Danakil depression at Lake Kulul near the Djibouti border with an elevation of 75 m below msl [9]. Fig. 1a shows the long-term annual rainfall distribution of Eritrea. Most of the Western Lowland and almost the whole eastern lowland areas receive an annual rainfall of less than 400 mm. The area experiences hot to very hot climate with a mean annual temperature of more than 27 °C. Rainfall is received from April/May to September/October provided by the south-western monsoons.

Eritrea has five major river basin systems, namely Red Sea, Barka-Anseba, Mereb-Gash, Danakil depression, and Setit (Fig. 1, b). From south to north, the main westward drainages of the Ethiopian-Eritrean Highlands are the Setit, Mereb-Gash, Barka-Anseba rivers. Each drains west-northwest to swing abruptly northwards as

they cross the line of the Barka lineament. Barka-Anseba river basin is a basin formed as a result of a confluence of two rivers, namely Barka and Anseba, close to the Sudan border in the extreme northwest of Eritrea. Due to the geography of Eritrea and thereupon its climate, the flows through most of the rivers are highly seasonal (ephemeral) with the exception of Setit — a Perennial River. The Western Lowlands plains are predominantly situated within the Barka-Anseba and Mereb-Gash river basins and Set it basin to some extent.

To achieve the objectives, qualitative and quantitative, descriptive and analytical research methodologies were used. Interviews and questionnaire survey were undertaken with targeted people, who had been involved in the implementation of various runoff irrigation as well as other water resources projects in Eritrea, with the intention of identifying existing challenges and their solutions. Secondary data obtained from various ministries were also utilized, notably the baseline survey from the Ministry of Agriculture (MoA). Besides, global and regional databases, which are freely available for public domain such as FAO-AQUASTAT, World Resources Institute (WRI), etc., were extensively employed to fill the gap in data insufficiency. Eventually, the collected information was analyzed and discussed as presented in the ensuing section.

Concepts of spate irrigation

Runoff irrigation or spate irrigation is a type of surface irrigation system usually practiced in arid and semi-arid regions where evapotranspiration greatly exceeds rainfall. It is defined as “an ancient irrigation practice that involves the diversion of flashy spate floods running off from mountainous catchments where flood flows, usually flowing for only a few hours with appreciable discharges and with recession flows lasting for only one to a few days, are channeled through short steep canals to banded basins, which are flooded to a certain depth” [11]. The structures used to divert the runoff flood to irrigation fields are made up of earthen, brushwood, gabion or concrete structures. The irrigation fields are flooded at least two to three times to a depth not less than 50 cm during rainy season. This process supplements the soil moisture content in the deep alluvial soils formed from the sediments deposited during previous irrigations. As such, crops can be grown from one or more irrigations with reduced risk of low yield during dry periods [6, 11].

The fraction of rainfall that flows over the landscape from higher to lower elevations is known as runoff. Runoff is usually associated with negative implications, such as erosion, water loss, etc. It can, however, be used for surface irrigation during rainfall events. It is accomplished by diverting runoff water into plots where crops are grown; each plot is surrounded by earthen bunds. Thus, the rainfall irrigation system provides the advantage of developing agricultural activities in areas where such activities are impossible without it. The amount of water that can be collected during a rainfall

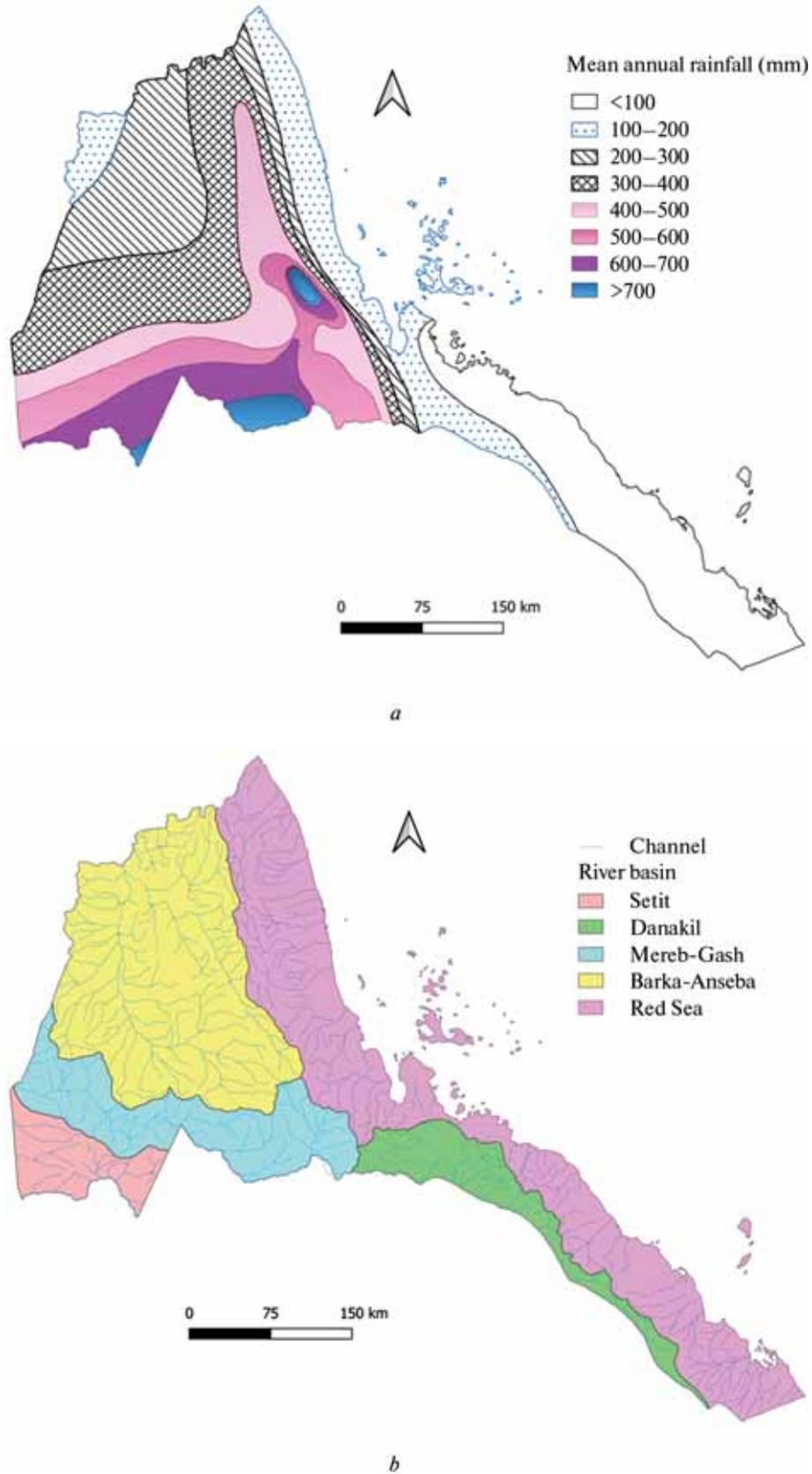


Fig. 1. Spatial distribution of annual rainfall (a) and major river basins of Eritrea (b)

event depends on rainfall and watershed characteristics. The main difference between runoff irrigation and conventional irrigation is that the timing and the amount of the application cannot be determined a priori. The variability in available water can be minimized by adjusting the size of the plots receiving runoff. Thus, in order to model the productivity of a crop in such a system, it is necessary to model the diverse processes involved such as rainfall, infiltration, surface flow and consumptive water use [9, 11, 12].

Historically, runoff irrigation is believed to be the oldest form of irrigation. It has been practiced for millennia in regions with arid and semi-arid climate setting. The most well-known runoff irrigation systems are found in the Arabian Peninsula, notably in Yemen, where it dates back to 2000 years, the Negev Desert region, which was built during the Israeli, Nabataean and Roman-Byzantine periods going back to 1300 to 2900 years. Nowadays, it is found in the Middle East, North Africa, West Asia, East Africa and parts of Latin America [13]. In Eritrea, the spate irrigation practice is alleged to have been introduced in the beginning of the 20th by Yemeni migrants. It has been widely practiced form of agriculture in Eastern Lowlands and some parts of Western Lowlands of Eritrea [9]. The FAO database¹⁰ also indicates that runoff irrigation has been extensively practiced in countries with arid and semi-climates (Table 1). Currently, Pakistan is the leading country in spate irrigation practices (720,000 ha), followed by Yemen (218,000 ha) and Ethiopia (200,000 ha). However, the highest percentage of area under spate irrigation to total irrigation is found in Somalia (75 %) and Eritrea (61 %). Here, it is worth reporting the fact that the date of data collection is variable as variable as two to threedecades.

Runoff irrigation system consists of two major components: catchment and field areas. While the catchment area generates runoff, the field grows crops

as a result of the application of diverted runoff. Two basic requirements must be met to establish a runoff irrigation system: (1) presence of mountainous or hilly topography with adjacent low-lying fields on the same plain and (2) a field with deep soils capable of storing sufficient moisture. The former generates runoff water that can be directed to the field so as to supply the crops during periods of no precipitation. Two different types of runoff irrigation systems are employed, depending on the slope of the terrain: micro and macro. Micro-catchment system is for locations where the catchment area and the fields lie neighboring to each other on the same plain. Macro-catchment system is a catchment area located on a slope with the usually terraced fields at the foot of the slope. The ratio of the catchment area to field area in micro-catchment runoff system varies from 1:1 to 10:1 and in macro-catchment systems from 10:1 to 100:1. For further details on the advantages and disadvantages of each method can be referred to the works of [9, 12].

Water is used for food production in various ways, including for agriculture, livestock and inland fishery production. Water use in agriculture ranges from essentially rainfed, relying on soil moisture from rainfall, to entirely irrigate. Rainfed agriculture covers 80 % of the world's cropland and accounts for the major part (60 %) of food production. Table 2 shows land cultivated and equipped for irrigation and agricultural water withdrawals in 2017. Irrigated agriculture covers about 22 % of cultivated lands. Water withdrawals from surface and groundwater resources for irrigation currently amount to 2,875 km³ per year, which represents 72 % of all water withdrawals in the world. In many drier countries, irrigation water use usually accounts for more than 90 % of total water withdrawals. For instance, the agricultural water withdrawal in Eritrea is 95 %. Worldwide, the total cultivated area is about 1565 million ha, which is approximately 12 % of the total land area.

Table 1. Area equipped for spate irrigation in selected countries¹⁰

Country	Area under spate irrigation (in 10 ³ ha)	Area under total irrigation (in 10 ³ ha)	% of total irrigation
Algeria	53	1230	4
Eritrea *	63	103.9	61
Ethiopia	200	858.3	23
Mongolia	27	84.3	32
Morocco	62.2	1,520	4
Pakistan	720	19,990	4
Somalia	150	200	75
Sudan	126	1852	7
Tunisia	27	486.6	6
Yemen	218	680.1	32

Note: * — MoA, 2013.

Table 2. Land cultivated and equipped for irrigation agricultural water withdrawals (in 2017)¹⁰

Region	Total cultivated land	Land equipped for irrigation	Land equipped for irrigation as % of total cultivated land	Total water withdrawal	Agricultural water withdrawal	Agricultural water withdrawal as % of total water withdrawal
	10 ⁶ ha	10 ⁶ ha	%	km ³ /year	km ³ /year	%
Africa	276	16	6	236	186	79
Americas	378	55	15	812	417	51
Asia	589	238	40	2,641	2,168	82
Europe	288	26	9	299	90	30
Oceania	34	3	9	22	14	63
World	1,565	338	22	4,010	2875	72
Eritrea	0.692	0.021	3	0.58	0.55	95

Presently, irrigation only covers 338 million ha, that is, 24 % of the world's arable land, but is responsible for around 40 % of world crop output. Irrigation uses about 70 % of waters withdrawn from global river systems. In different regions of the world depending on the local climatic and other factors different types of water management with different levels of service will be appropriate¹⁰. The extent of the role played by water management in different continents and types of countries as far as agricultural production is concerned is presented in Table 3. Eritrea covers an area of 117,600 km² and has a coastline of over 1,000 km. The total cultivable area is estimated at around 1.5 million ha. In 2017, the total cultivated area was 692,000 ha, out of which 690,000 ha arable land and 2,000 ha permanent crops (Table 3). Most of the country consists of savannah, steppes and desert, particularly in the south-western lowlands and in the east near the Red Sea. The highlands, where altitudes range between 1,500 and 2,000 m above mean sea level (msl) are among the oldest areas cultivated by humans and are showing signs of overuse. The population density with reference to total area and arable land are estimated to be 29 and 493 persons per km², respectively. This is

actually lower than the values corresponding to continental, global and even least developed values.

Of the country's land area of 11.76 million hectares only about 417,000 (3.4 %) are under rainfed cultivation or fallow, while mere 22,000 ha (0.18 %) are irrigated. Nevertheless, agriculture is the most important sector of the Eritrean economy, accounting for about 50 % of the gross domestic product and the bulk of export earnings. In Eritrea the greatest part of the agricultural sector is run by subsistence farmers, who cultivate more or less from one to three hectares depending on the availability of land. Main source of their production are a wide range of rainfed crops grown in the above mentioned different agroecological zones of the country. Among the most important of these are cereals, pulses, oil seeds, fibre crops, spices, medicinal plants, and others. However, some farmers, where water is available, grow also vegetables under irrigation during the winter dry season.

A properly managed and developed irrigation system is one of the methods used to increase food production and thereupon poverty reduction in arid and semi-arid regions; it can enhance food security, promote economic growth and sustainable development, create

Table 3. Population density with reference to total area and arable land^{9, 10, 11}

Region	Total area (10 ⁶ ha)	Total population (millions in 2017)	Arable land (10 ⁶ ha)	Population density in persons/km ² with reference to	
				total area	arable land
Africa	3,033	1,300	241	43	539
Americas	4,065	1,014	351	25	289
Asia	3,200	4,600	498	144	924
Europe	2,333	747	273	32	274
Oceania	856	42	32	5	131
World	13,487	7,703	1395	57	552
Eritrea	11.76	3.412	0.69	29	493
Least developed	2,078	1,000	183	48	546

¹¹ Frenken K. Irrigation in Africa in figures AQUASTAT Survey 2005. *Food and Agriculture Organization Water Reports* — 29. Rome, FAO, 2005.

employment opportunities, improve living conditions of farmers as well as recharge groundwater. Runoff irrigation can be classified into traditional (uncontrolled) and improved (controlled). The former relies heavily on sand, stone and brushwood spurs and earthen guide bunds, which are damaged frequently; flexible, based on locally available material, relatively efficient, and limit diversion of high flows and high sediment loads. The downside of such system is that it requires enormous input of labour and resources for maintenance and reconstruction. In the improved (controlled) type, more robust and more permanent diversion and water control structures are usually constructed, reducing excessive maintenance burden. This technique too has disadvantages such as low economic returns and diversion and sedimentation problems.

According to FAO [11], there are four common features of spate irrigation schemes: ingenious diversion systems, built to capture short floods but also designed to keep out the larger and most destructive water flows; sediment management — the flood water has high sediment loads that would otherwise fill reservoirs and clog intake structures and distribution canals; soil moisture conservation; and complex social organization. Understanding the hydrology (also called spate hydrology in this context) of the catchment area is critical to develop spate irrigation system. The potential yield of spate irrigation systems, the design of diversion structures and canals and the area to be potentially irrigated is governed by the hydrology of the area [14]. Spate hydrology is characterized by a great variation in the size and frequency of floods, which directly influence the availability of water. Spate floods can have very high peak discharges that make it very difficult to determine the volumes of water that will be diverted to irrigation fields. Various studies conducted in Saudi-Arabia, Yemen and Eritrea have shown that very poor correlation between observed rainfall and runoff [9, 11, 15, 16]. Estimates of flood discharges and runoff volumes derived from conventional rainfall/runoff models are therefore of limited use in spate systems. The important hydrological parameters that need to be determined include estimating mean annual runoff using a runoff coefficient, runoff volume, the

proportion of annual runoff that is to be diverted, and design flood (discharge). The mean annual runoff usually accounts for 5 to 10 % of the mean annual precipitation. Another important characteristic of spate floods is that they transport very high sediment loads (2 to 3 times more than runoff in perennial rivers. Therefore, management of sedimentation is a key factor in spate irrigation design.

RESULTS OF THE RESEARCH

The term irrigation potential in this study is used to describe total irrigation practices, such as pressurized, border, spate, etc. or a particular type of irrigation, for instance, spate irrigation. Eritrea’s total irrigation potential can be better understood by evaluating the water availability or runoff volume in the major river basins as presented in Table 4. Accordingly, the Setitbasin has the highest irrigation potential (225,000 ha) followed by Red Sea and Mereb-Gash with lower runoff coefficient. Nevertheless, when annual runoff volumes are considered, Mereb-Gash is the leading one (532 million m³) as a result of highest runoff coefficient. The Barka-Anseba and Danakil depression lack credible information about their irrigation potentials. Although the annual rainfall volume of the Barka-Anseba basin is estimated at 14,815 million m³, the annual flow volume is estimated at only 41 million m³. This is perhaps because of greater values of infiltration rates into the sandy plains of the river valleys. Generally, the Setit, Barka-Anseba, and Mereb-Gash river basins, whose downstream plains located in the Western Lowlands, are among the major river basins with the highest irrigation potential. The total potential area where runoff irrigation system can be developed at national level is estimated to be 187,500 ha, out of which nearly 50,000 ha are found along the major river basins in the Western Lowlands and the rest along the coastal plains in the Eastern Lowlands [12]. In fact this estimate seems to underestimate far below the actual potential reported by the MoA, Eritrea.

Table 5 represents the agricultural potentials of Eritrea and its current status. Out of the total land area of Eritrea, total potential cultivable land amounts to 2.1

Table 4. Runoff flow volumes and irrigation potentials of major river basins [12]

Basin	Area, km ²	Mean annual rainfall, mm	Mean annual rainfall volume, 10 ⁶ m ³	Annual flow volume, 10 ⁶ m ³	Mean annual runoff coefficient	Potential irrigation land (in 10 ³ ha)
	1	2	3 = 1×2	4	5 = 4/3	
Red Sea	44,689	350	15,641	444	0.028	137
Barka-Anseba	39,506	375	14,815	41	0.003	N/A
Mereb-Gash	23,455	600	14,073	532	0.038	67.56
Danakil	10,532	200	2,106	135	0.064	N/A
Setit	7,517	650	4,886	49	0.010	224.6
Total	125,699	—	51,521	1,201	0.023	429.16

Note: N/A — not available.

million ha; 71.4 % (1.5 million ha) of it is rainfed and 28.6 % (0.6 million ha) is irrigable. Currently, only 416,000 ha (28 %) of the potential cultivable rainfed is actually cultivated whereas out of the potential cultivable irrigated land, 104,000 ha (17 %) is actually irrigated. As noted earlier, FAO-AQUASTAT database estimations are much lower than the official reports from MoA. Such disparities are also reported in actual area equipped for irrigation. For example, actual area equipped for spate irrigation in Eritrea is estimated to be between 17,490 and 63,000 ha by FAO-AUASTAT and MoA, respectively. In the latter case (in 2013), the total actual area equipped for spate irrigation was only 33.6 % of the total irrigation potential estimated by FAO-AQUASTAT (187,500 ha) or 9.3 % of the irrigation potential estimated by MoA (0.6 million ha). This shows that there are still possibilities for expansion of the existing systems. The reason for disparity in irrigation potential estimation could be related to the timing of data collection. However, due to the incompleteness of the information from either of them, both data sources are employed for analysis. Table 6 shows irrigation potential by sources of water; hence, the actual area equipped for irrigation is predominantly dependent on surface water than groundwater. The total area equipped for irrigation by groundwater and surface water is 21,590 ha, of which 82 % uses surface water and the remaining 18 % depends on groundwater¹⁰.

Table 5. Agricultural potential and current status in Eritrea

Agricultural land	Area (in 10 ³ ha)
Country area	11,760
<i>Potential cultivable land</i>	
Rain-fed	1,500
Irrigation	600
<i>Total potential cultivable land</i>	2,100
a. Actual cultivated rain-fed	416.1
b. Actual area equipped for irrigation	
Spate irrigation	63
Dams	8.6
Pressurized irrigation	5.4
Well irrigation (open channel)	26.9
Total actual area equipped for irrigation	103.9
Total actual cultivated (a and b)	520

Note: Source: MoA, 2013.

Table 6. Irrigation potential by groundwater and surface water¹⁰

Region	Area equipped for irrigation, ha	% of area equipped for irrigation	Full/partial controlled irrigation, ha	% of full/partial controlled irrigation	Spate irrigation, ha	Irrigation potential, ha
Groundwater	3,960	18.3	3,960	96.6	—	—
Surface water	17,630	81.7	140	3.4	17,490	—
Total	21,590	100	4,100	100	17,490	187,500

The performance of a spate irrigation system, irrespective of its scale, can be generally described in terms of equity, regularity and reliability of water delivery, and durability [9, 17]. Fadul and others [6] revealed that the most effective measures include pre-flood preparedness, risk sharing measures through water and land management during and after flood by water user associations, crop management by farmers, and flexibility in operation by water managers. On the other hand, like any engineering interventions, complete and partial failures have had serious implications on the economy, livelihoods of communities and the environment. Various literatures [18, 19] found that users of state-administered irrigation systems are less aware of the implementation of rules and sanctions for noncompliance, due to externally enforced rules. In this regard, despite the promising efforts made to establish improved spate irrigation systems in potential Western Lowlands, their overall performance is low. For example, even though the spate irrigation systems doubled quantitatively (from 16 to 35) over the period of 2003 and 2016 in Gash-Barka region alone, none of them were fully functional as of 2016. Fig. 2 shows the complete and partial failure of the runoff diversion structures in Hashenkit and Golij (Engulit). After few initial years of operation, the Hashenkit project failed miserably (Fig. 2, a), following structural failure of its components. Thenceforth, inundation of the nearby plains including residential areas has been reported during extreme floods. Similarly, Golij diversion structure was severely out of order (Fig. 2, b): upstream side filled with sediments; gates damaged and/or blocked, and downstream tail beginning to scour. Failures of these types are prevalent in almost all the projects. The question that requires to be answered is, therefore, what could be the motive for such failures.

To somehow answer the aforesaid question, we undertook a survey on targeted persons on the causes, reasons and consequences of runoff diversion systems in the Western Lowland and summary of the survey is presented in Table 7. As such, three causes are identified: structural design and construction, operation and maintenance, and management. The first problem mainly stems from incorrect hydrological predictions from ungauged catchments, leading ultimately to over-design and under-design of hydraulic structures and accumulation of sediments. These predictions include peak floods, rainfall volume, sediment load, etc. Practical experiences

from one of the earliest post-independence modern technology-based spate irrigation systems in Shieb (Eastern Lowland of Eritrea) also showed the following problems [9]: uncertainty in estimating extreme flood return period; a limited knowledge of appropriate concept for developing improved spate irrigation system and the technical problems dealing with destructive floods and high sediment; the lack of ownership and adequate provision for operation and maintenance after completion of improved system; and adoption of new technologies

and concepts by the farming community needs more time, personnel and budget than expected. More or less the same problems have persisted in the spate irrigation systems established thenceforth in the Western Lowland plains (for example, Hashenkit, Golij-Engulit, Mogoraib, etc.). These problems are seemingly common in arid and semi-arid regions where spate irrigation is widely practiced. In most cases, the main source of risk is the extreme variability of rainfall, causing unpredictable flows regarding volume, timing and duration [20].



Fig. 2. Complete and partial failure of the irrigation diversion structures in Hashenkit (a) and Golij-Ingulit (b)

Table 7. Causes, reasons and consequences of runoff irrigation systems in the Western Lowland

Cause	Reason	Consequence
Structural design and construction	Designs of the main diversion structures are not based on long-term measured data of flood discharge, rainfall volume of catchments, stream flow discharge, sediment load, etc.	Underestimation and overestimation leads to economically and structurally unviable systems; accumulation of sediments at the upstream of the headworks and main canal intake that substantially reduce the amount of water being diverted to the fields
Operation and maintenance	Inadequate funds for repair and maintenance of gates, weirs, canals, etc.; lack of awareness, communication, coordination and leniency	Affects the smooth functioning of the system ultimately leading to total abundance of a project: deposition of excess sediments can block and damage gates, etc.; degradation of irrigation infrastructure; and inequity in access to water.
Management	Lack of proper planning and technical know-how, absence of follow up by experts and extension services, lack of regulatory mechanisms, and weak organization of beneficiaries	Inefficient with low economic return system; and long-term socio-economic and environmental impacts

CONCLUSION AND DISCUSSION

Runoff irrigation or spate irrigation is a type of surface irrigation system usually practiced in arid and semi-arid regions where evapotranspiration greatly exceeds rainfall. This system is believed to have been introduced more than century ago to the coastal Eastern Lowlands of the country. The Western Lowlands of

Eritrea with arid and semi-arid climate also has enormous spate irrigation development potential. As such, commendable endeavors have been attempted to establish projects of that kind since recently so as to enhance food security, economy and livelihood of communities in the immediate proximities. However, this study indicated that these projects, which are almost developed in hydrologically ungauged catchments, have hardly

achieved their intended purposes so far. This is possibly due to factors that are inextricably linked: structural design and construction as a result of absence of and/or insufficiency of hydrological data, operation and maintenance, and management. Obviously, viable solutions to these issues require multi-dimensional and multi-disciplinary approaches. The results from the survey on targeted persons was in-line with the hypothetical assumption of lack of hydrological data could be the main cause of runoff irrigation systems in the Western Lowlands. Thus, assuming the hydrological predictions as a highly likely plausible scenario, the following approaches are suggested:

- to use global reanalysis datasets as forcing data in physically-based mathematical models for continuous event simulations of flows (e.g. SWAT and MIKE). Results from these models will help us to determine annual runoff volume which is critical for determining the irrigation command areas and its management;

- to estimate single event-based design flood hydrographs using physiographic and geomorphologic catchment characteristics that can be obtained from topographic maps or remote sensing-based digital elevation models. This will be used for designing hydraulic components such as canals, spill-ways, water intakes, and gates.

REFERENCES / ЛИТЕРАТУРА

1. Buhaug H., Benjaminsen T.A., Sjaastad E., Magnus Theisen O. Climate variability, food production shocks, and violent conflict in Sub-Saharan Africa. *Environmental Research Letters*. 2015; 10(12):125015. DOI: 10.1088/1748-9326/10/12/125015
2. Lickley M., Solomon S. Drivers, timing and some impacts of global aridity change, *Environmental Research Letters*. 2018; 13(10):104010. DOI: 10.1088/1748-9326/aae013
3. Rajah K., O'Leary T., Turner A., Petrakis G., Leonard M., Westra S. Changes to the temporal distribution of daily precipitation. *Geophysical Research Letters*. 2014; 41(24):8887-8894. DOI: 10.1002/2014GL062156
4. Falkenmark M., Widstrand C. Population and Water Resources: A delicate balance. *Population Bulletin*. 1992; 47(3):1-36.
5. Ahuja S. Overview of global water challenges and solutions. *ACS Symposium Series*. 2015; 1-25. DOI: 10.1021/bk-2015-1206.ch001
6. Fadul E., Masih I., De Fraiture C. Adaptation strategies to cope with low, high and untimely floods: Lessons from the Gash spate irrigation system, Sudan. *Agricultural Water Management*. 2019; 217:212-225. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.02.035
7. Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V. Spatial and statistical variability analyses of satellite-based climatic data in Mereb-Gash basin. *Water Resources*. 2021; 48(1):146-157. DOI: 10.1134/S0097807821010152
8. Debesai M.G. Factors affecting vulnerability level of farming households to climate change in developing countries: Evidence from Eritrea. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 1001:012093. DOI: 10.1088/1757-899x/1001/1/012093
9. Haile A.M. *A tradition in transition: Water management reforms and indigenous spate irrigation systems in Eritrea*. London, Taylor&Francis, 2007; 212. DOI: 10.1201/9781439828380
10. Ghebreamlak A., Tanakamaru H., Tada A., Adam B.A., Elamin K. Satellite-Based Mapping of Cultivated Area in Gash Delta Spate Irrigation System, Sudan. *Remote Sensing*. 2018; 10(2):186. DOI: 10.3390/rs10020186
11. Van Steenberg F., Lawrence P., Haile A.M., Salman M., Faures J.M. *Guidelines on spate irrigation: FAO irrigation and drainage paper 65*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010
12. Mehari A., Tesfai M. Irrigation development in Eritrea: potentials and constraints, in Irrigation development in Eritrea: potentials and constraints. *Proceedings of the workshop of the Association of Eritreans in Agricultural Sciences (AEAS) and the sustainable land management programme (SLM) Eritrea 14-15 August 2003*. 2005; 23-30.
13. Van Steenberg F., Haile A.M., Alemehayu T., Alamirew T., Geleta Y. Status and potential of spate irrigation in Ethiopia. *Water Resources Management*. 2011; 25(7):1899-1913. DOI:10.1007/s11269-011-9780-7
14. Embaye T.G., Beevers L., Haile A.M. Dealing with sedimentation issues in spate irrigation systems. *Irrigation and Drainage*. 2012; 61(2):220-230. DOI: 10.1002/ird.630
15. Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V. Hydrological modelling for ungauged basins of arid and semi-arid regions: review. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2019; 14(8):1023-1036. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1023-1036
16. 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
17. Tola T.L., Haile A.M. Toward better institutional setup in spate irrigation system: the case study of Yandafero-Konso lowland spate irrigation system, Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*. 2020; 6(1). DOI: 10.1007/s40899-020-00359-x
18. Kamran M.A., Shivakoti G.P. Comparative institutional analysis of customary rights and colonial law in spate irrigation systems of Pakistani

Punjab. *Water International*. 2013; 38(5):601-619.
DOI: 10.1080/02508060.2013.828584

19. Kamran M.A., Shivakoti G. P. Institutional response to external disturbances in spate irrigation systems of Punjab, Pakistan. *International Journal of Agricultural*

Resources, Governance and Ecology. 2014; 10(1):15.
DOI: 10.1504/ijarge.2014.061039

20. Fadul E., De Fraiture C., Masih I. Risk propagation in spate irrigation systems: A Case Study from Sudan. *Irrigation and Drainage*. 2018; 67(3):363-373.
DOI: 10.1002/ird.2218

Received June 12, 2021.

Adopted in revised form on August 25, 2021.

Approved for publication on August 25, 2021.

BIONOTES: **Anghesom A. Ghebrehiwot** — Lecturer 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; SPIN-code: 5878-6674; Scopus: 36787104800, ResearcherID: B-4808-2016, ORCID: 0000-0002-9440-0341; KozlovDV@mgsu.ru.

Поступила в редакцию 12 июня 2021 г.

Принята в доработанном виде 25 августа 2021 г.

Одобрена для публикации 25 августа 2021 г.

О Б АВТОРАХ: **Ангхесом Алемнгус Гебрехивот** — преподаватель сельскохозяйственного колледжа Хамельмало; **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; SPIN-код: 5878-6674, Scopus: 36787104800, ResearcherID: B-4808-2016, ORCID: 0000-0002-9440-0341; KozlovDV@mgsu.ru.

Определение модельных величин затрат на канализационных очистных сооружениях в случае применения различных технологических схем очистки

Н.А. Макиша

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается определение с применением специализированного программного обеспечения ключевых составляющих эксплуатационных затрат на станциях очистки сточных вод производительностью от 1 до 100 тыс. м³/сут.

Материалы и методы. Исследованы две технологические схемы очистки — схема глубокой биологической очистки в классической компоновке аэротенк – вторичный отстойник и схема глубокой биологической очистки с использованием мембранных модулей для илоразделения. Прочие сооружения для двух данных сооружений были приняты идентичными. Поскольку важным представлялось получить результаты, которые возможно было бы использовать на объектах отрасли, в качестве исходных данных для расчетов приняты типичные для городских сточных вод величины концентраций основных загрязнений до очистки, а также технологические параметры работы.

Результаты. Получены и проанализированы величины концентраций загрязнений в сточных водах после очистки с применением обеих технологических схем и величины требуемых объемов для обустройства сооружений биологической очистки и занимаемая ими площадь. Эксплуатационные затраты были рассмотрены с точки зрения затрат электроэнергии для эксплуатации сооружений биологической очистки и очистных сооружений в целом, а также удельных затрат электроэнергии на очистку 1 м³ сточной жидкости. Рассчитаны расходы на приобретение мембранных модулей, которые могут быть отнесены к эксплуатационным в силу необходимости их замены каждые 7–10 лет.

Выводы. Результаты проведенного исследования показали, что применение мембранных технологий на стадии биологической очистки может иметь значительный потенциал при реконструкции сооружений в условиях увеличения производительности и ограниченных возможностей для расширения площади.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: очистка сточных вод, биологическая очистка, мембранный биореактор, устойчивое развитие, затраты электроэнергии, удельные затраты

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Макиша Н.А. Определение модельных величин затрат на канализационных очистных сооружениях в случае применения различных технологических схем очистки // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 8. С. 1077–1087. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1077-1087

Determination of modeled costs at sewage treatment plants in the case of different sequences of treatment

Nikolay A. Makisha

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

ABSTRACT

Introduction. The article considers the definition of the key components of operating costs at wastewater treatment plants with a capacity of 1 to 100 thousand cubic meters per day by modeling using specialized software.

Materials and methods. In the study, two technological cleaning schemes were investigated — the conventional line-up with biological aeration reactor and secondary clarifier and the scheme of biological aeration reactor with submerged membrane bioreactor for sludge separation. The other structures for the two facilities were identical. Since it was important to obtain results that could be used at real facilities, the values of concentrations of major pollutants typical for urban wastewater before treatment, as well as technological parameters of operation, were used as initial data for calculations.

Results. As the results of calculations, the values of concentrations of pollutants in wastewater after treatment using both technological schemes and the values of the required volumes for the arrangement of biological treatment facilities and the area occupied by them were obtained and analyzed. Operating costs were considered in terms of electricity costs for the operation of biological treatment facilities and treatment facilities in General, as well as the specific cost of electricity for treatment 1 m³ of wastewater. In addition, the cost of purchasing membrane modules was calculated, which can be classified as operational due their replacement frequency of approximately every 7–10 years.

Conclusions. The results of the study showed that application of membrane technologies at the stage of secondary treatment could have a significant potential for the reconstruction of wastewater treatment plants in conditions of increased productivity and limited opportunities for expanding the area.

KEYWORDS: wastewater treatment, biological removal, membrane reactor, sustainable development, cost calculation, energy consumption

FOR CITATION: Makisha N.A. Determination of modeled costs at sewage treatment plants in the case of different sequences of treatment. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(8):1077-1087. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1077-1087 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Концепция устойчивого развития — глобальный тренд, ориентированный на разработку решений для той или иной области народного хозяйства, которые не просто будут наиболее эффективными с точки зрения прямого применения, но и позволят снижать воздействие на окружающую среду, а их внедрение потребует минимальных затрат. С этой точки зрения технологии очистки сточных вод как нельзя лучше вписываются в идеологию устойчивого развития, поскольку высокое качество очистки способствует созданию качественной среды обитания и снижает негативное влияние на водные объекты, почву, атмосферу и т.д. При этом технологии очистки сточных вод являются энергозатратными, чем жестче требования к качеству очистки, тем выше затраты [1–3].

В настоящее время требования по сбросу очищенных сточных вод в большинстве случаев регламентируются территориальными нормативными актами в соответствии с категорией водного объекта, которые чаще всего основаны на приказе Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 № 552, поскольку он содержит обширный перечень загрязняющих веществ и требований по предельно допустимому сбросу.

Если рассматривать сооружения очистки городских сточных вод, то необходимо понимать, что большая часть из них возведена несколько десятков лет назад и им нужна реконструкция с глубокой модернизацией хотя бы в силу существенного физического и морального износа [4, 5]. При этом неизбежно возникает потребность в изменении производительности и обеспечении требуемых величин предельно допустимого сброса. Предполагаемые к внедрению технологии и решения предусматривают глубокий анализ с технологической и экономической позиций, при этом именно экономический фактор зачастую служит определяющим, поскольку достаточно распространена ситуация, когда процесс модернизации разбит на несколько этапов в силу ограниченного финансирования в рамках каждого из них [6]. Еще одним лимитирующим показателем являются пространственные ограничения в случае, когда расширить имеющиеся объемы не представляется возможным [7]. В связи с этим возникает необходимость поиска и дальнейшего применения таких способов модернизации, которые бы позволили решить или максимально приблизиться к решению поставленной задачи в условиях оговоренных ограничений [8, 9].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В статье предпринята попытка сформулировать динамический предпроектный анализ технологических и эксплуатационных показателей различных решений, которые могут быть использованы, в том числе, при осуществлении модернизации станции очистки сточных вод. В качестве инструмента моделирования и расчета было использовано программное обеспечение CapdetWorks 4.0 [10, 11]. Процедура расчета построена следующим образом. Перед расчетом были установлены исходные эксплуатационные показатели — производительность и концентрации основных загрязнений в сточных водах, поступающих на очистку. Затем формировался технологический цикл работы станции с определением необходимых характеристик отдельных процессов. Результатом моделирования и расчета стало выявление выходных параметров — концентрации загрязнений в очищенной воде, объемов сооружений и площади, ими занимаемой, энергопотребления на различные технологические нужды. Требуемые корректировки проводились с целью получения близких результатов к параметрам эксплуатации действующих очистных сооружений. Расчет объемов емкостных сооружений производился на основе необходимого времени обработки сточных вод, расчет затрат электроэнергии проведен на основе технологических потребностей процессов очистки и требуемой мощности оборудования.

Для изучения влияния отдельных эксплуатационных показателей на экономические показатели всей станции очистки в рамках исследования рассмотрены несколько значений производительности станций очистки сточных вод: 1, 5, 10, 20, 50 и 100 тыс. м³/сут. Выбранные значения соответствуют примерному диапазону численности населения от 5 до 400 тыс. чел., к которому относится большинство населенных пунктов Российской Федерации.

В ходе исследования проанализированы две технологические схемы с классической последовательностью процессов очистки, которая реализуется на большинстве существующих сооружений: блок механической очистки, блок биологической очистки, дезинфекция. В качестве сооружений обработки осадка принята также довольно распространенная схема с уплотнителями избыточного активного ила (ИАИ), анаэробным сбраживанием смеси ИАИ и сырого осадка и ее последующим обезвоживанием на фильтр-прессах.

Если речь идет о главных факторах (взвешенные вещества, БПК, биогенные элементы), то основная

масса загрязнений по ним удаляется на стадии биологической очистки, т.е. фактически данная стадия является ключевым элементом любой технологической схемы очистки сточных вод. И эта же стадия очистки наиболее энергоемка. В рамках проводимого исследования основное внимание уделено сравнению затрат стадии биологической очистки для различных технологических схем. Кроме того, модернизация стадии биологической очистки более сложная, поэтому важно обоснование применения тех или иных решений [12].

Таким образом, состав (именно состав, а не количество отдельных сооружений, их габариты и пр.) блока механической очистки, сооружений дезинфекции и обработки осадка для обеих изучаемых схем был одинаковым, различия наблюдались только на стадии биологической очистки. Следует отметить,

что решения, принятые для сооружений биологической очистки (в зависимости от используемой технологии), могут влиять на конструктивные и технологические особенности других сооружений.

В качестве первой исследуемой схемы принята классическая схема биологической очистки аэротенк – вторичный отстойник (гравитационное ило-разделение). Аэротенк был принят с глубоким удалением азота (рис. 1).

Вторым вариантом стала технология с мембранным биореактором (МБР) погружного типа, при которой аэротенк (реактор) биологической очистки оснащается мембранными модулями, т.е. разделение иловой смеси осуществляется мембранным способом (рис. 2). Для второго технологического решения вторичный отстойник не требуется.

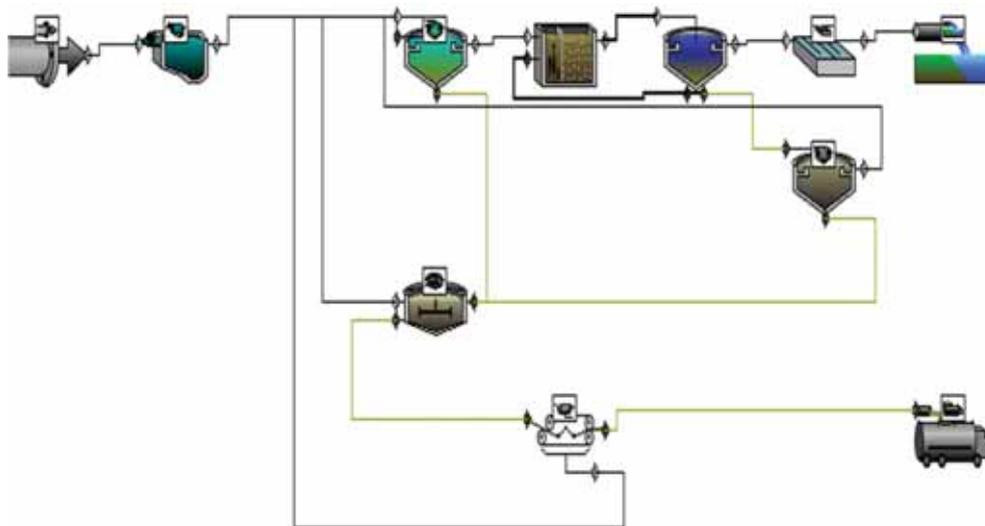


Рис. 1. Технологическая схема очистки по варианту 1

Fig. 1. Technological sequence – option 1

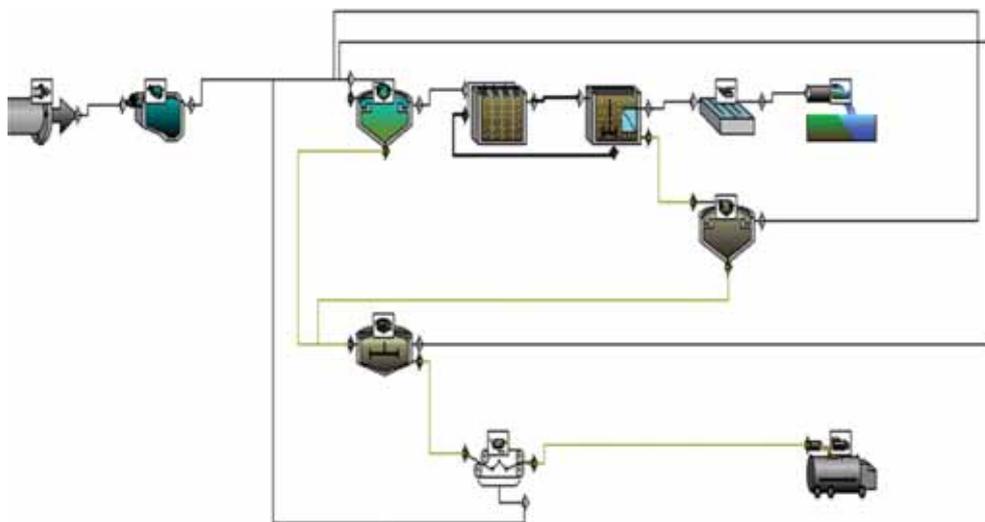


Рис. 2. Технологическая схема очистки по варианту 2

Fig. 2. Technological sequence – option 2

Эксплуатация в условиях нашей страны классической комбинации аэротенк – вторичный отстойник хорошо изучена как с технологической точки зрения, так и с экономической. Сочетание аэротенков с мембранными биореакторами в РФ на практике пока встречается редко, поэтому расчетные показатели, полученные в ходе настоящего исследования, могут иметь определенную практическую значимость для дальнейшего обоснования применения данной технологии.

Выбор для сравнения именно этих вариантов обусловлен тем, что МБР позволяют на одной стадии процесса очистки добиться сопоставимых результатов, что и при использовании реакторов глубокой биологической очистки с доочисткой. При этом увеличенная доза ила, объем и площадь аэротенков — в 2–4 раза, объем сооружений илоразделения — не менее чем в 2 раза. Таким образом, площадь всей системы биологической очистки может быть сокращена в 2–3 раза, а объем — в 3–4 раза по сравнению с использованием вторичных отстойников¹.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Перед началом расчета определены основные параметры, характерные для работы обоих технологических вариантов (табл. 1). Для классической схемы биоочистки концентрация ила в аэротенке обычно принимается при расчетах на уровне 3 г/л. Достаточно распространена практика использования увеличенной дозы ила для достижения более высокого качества очистки или в случае повышенных концентраций загрязнений в исходной сточной воде. Важно отметить, что увеличение дозы ила в классическом аэротенке может быть затруднительно, поскольку это неизбежно приводит к увеличению на-

¹ ИТС 10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов.

Табл. 1. Исходные технологические характеристики

Table 1. Initial technological parameters

Показатель Indicator	Единицы измерения Units	Значение Meaning	
		Вариант 1 Option 1	Вариант 2 Option 2
Доза ила Sludge dose	г/л g/l	3	7
Возраст ила Sludge age	сут days	20	20
Интенсивность аэрации Aeration intensity	м ³ /м ³ m ³ /m ³	12	12
Удельный расход через мембрану Specific flow rate through the membrane	л/ч·м ² l/hour · m ²	–	20
Плотность упаковки мембран Membrane packing density	м ³ /м ³ m ³ /m ³	–	130

грузки на вторичный отстойник, количества ИАИ, и соответственно затрат на его обработку.

Если говорить о дозе ила, принимаемой при эксплуатации мембранных биореакторов, то обычно она находится в диапазоне от 6 до 12 г/л. Для исследуемого моделирования принята величина 7 г/л [13]. На основании опыта эксплуатации очистных сооружений возраст ила для обоих случаев взят равным 20 суток. При подборе показателей работы МБР были приняты усредненные величины на основании существующего опыта эксплуатации. Величина плотности упаковки мембран соответствует кассетам мембран фирмы Kubota [14].

В табл. 2 представлены принятые для расчета исходные концентрации загрязнений в сточных водах, поступающих на очистку, что напрямую влияет на выбор и технологические параметры используемой технологии. Следует отметить, что в рамках исследования не анализировались показатели «Нефтепродукты», «Сульфат-анион», «Хлорид-анион», «Железо общее» и «АПАВ», поскольку расчеты по ним не проводятся в использованном программном комплексе CapdetWorks 4.0.

Исходные значения в целом соответствуют усредненному качеству поступающих на очистные сооружения городских сточных вод. Кроме того, в табл. 2 также приведены рассчитанные при помощи программного комплекса CapdetWorks 4.0 значения концентраций загрязнений в очищенной воде. Важным условием расчета является получение сходных показателей с показателями реальных станций очистки сточных вод, поэтому итерационно происходил подбор параметров работы сооружений для получения сопоставимых значений. В результате были получены значения, которых возможно добиться при использовании указанных сооружений биологической очистки сточных вод.

Как видно из табл. 2, расчетные значения для процессов очистки в целом соответствовали действующим нормативным требованиям, т.е. технологиче-

Табл. 2. Концентрации загрязнений, принятые для расчета

Table 2. Pollution values applied in the calculation

Показатель Indicator	Единицы измерения Units	Концентрация Concentration			ПДК ² Maximum permissible concentration
		До очистки Before cleaning	После очистки After cleaning		
			Вариант 1 Option 1	Вариант 2 Option 2	
БПК ₅ BOD ₅	мгО ₂ /л mgO ₂ /l	200	2,3	1,6	2,1
ХПК COD	мгО ₂ /л mgO ₂ /l	350	7,9	5,6	15 ³
Взвешенные вещества Suspended solids	мг/л mg/l	215	10	3,0	Фон + 0,25 Background + 0,25
N-NH ₄	мг/л mg/l	45	0,38	0,33	0,4
N-NO ₂	мг/л mg/l	–	0,05	0,02	0,02
N-NO ₃	мг/л mg/l	–	10	9,0	9,0
P-PO ₄	мг/л mg/l	10	0,4	0,02	0,2

² Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 № 552.

³ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

ски обе схемы могут справляться с поставленной задачей. При этом следует понимать, что качество (эффект) очистки не является постоянной величиной в случае возможных колебаний состава загрязнений в поступающих на обработку сточных водах. В случае наличия таких условий опыт эксплуатации мембранных биореакторов демонстрирует малую зависимость качества очистки от резких колебаний состава загрязнений, что свидетельствует о более высокой устойчивости системы по сравнению с другими технологическими решениями [15, 16].

Как только итоги расчета были приближены к условиям реальной эксплуатации с точки зрения технологических показателей, что, безусловно, приоритетно при рассмотрении эксплуатации очистных сооружений, проведен укрупненный анализ показателей, которые в дальнейшем могут быть использованы для определения затратных составляющих. Первым показателем, который возможно оценить в данном случае, служат объемы сооружений и необходимая площадь для их расположения (табл. 3), которые также были получены при помощи программного комплекса CapdetWorks 4.0.

Табл. 3. Площадь и объем сооружений биологической очистки при различной производительности

Table 3. Area and volume of secondary treatment facilities of various capacity

Расход, м ³ /сут Consumption, m ³ /day	Площадь, м ² Area, m ²			Объем, м ³ Volume, m ³		
	Вариант 1 Option 1		Вариант 2 Option 2	Вариант 1 Option 1		Вариант 2 Option 2
	A Aerated lagoon	BO Secondary sand	A + МБР Aerated lagoon + Membrane module	A Aerated lagoon	BO Secondary sand	A + МБР Aerated lagoon + Membrane module
1000	159	50	87	476	125	261
5000	600	288	327,5	2400	720	1310

Расход, м ³ /сут Consumption, m ³ /day	Площадь, м ² Area, m ²			Объем, м ³ Volume, m ³		
	Вариант 1 Option 1		Вариант 2 Option 2	Вариант 1 Option 1		Вариант 2 Option 2
	А Aerated lagoon	ВО Secondary sand	А + МБР Aerated lagoon + Membrane module	А Aerated lagoon	ВО Secondary sand	А + МБР Aerated lagoon + Membrane module
10 000	960	498	520	4800	1494	2600
20 000	1860	995	1046	9300	2985	5230
50 000	4900	2870	2620	24 500	11 480	13 100
100 000	9600	4980	5220	48 000	19 920	26 100

Если для варианта 1 получены значения объемов и площади расположения отдельных сооружений — аэротенка (А) и вторичного отстойника (ВО), то для варианта 2 мембранные модули (МБР) интегрированы в объем аэротенка, т.е. в первом случае рассматриваются два сооружения, во втором — только одно. Соответственно, расчеты показали, что переход на использование мембранных биореакторов, интегрированных в аэротенк, позволяет сократить потребность в объемах емкостных сооружений примерно на 60 % и почти на 65 % снизить требуемые площади для размещения сооружений (рис. 3).

В этом случае можно говорить о снижении потребности в объемах емкостных сооружений за счет двух факторов — меньшее время пребывания в аэротенке (реакторе биологической очистки) и уход от строительства вторичных отстойников. При этом

необходимо отметить, что данное обстоятельство актуально для вновь строящихся сооружений. При осуществлении работ по модернизации существующих сооружений и условия изменения имеющейся схемы (почти всегда это — схема с гравитационным разделением иловой смеси во вторичных отстойниках) на схему с мембранным илоразделением можно будет говорить об освобождении имеющихся объемов, в том числе для иных нужд, что может быть особенно актуально в случае увеличения производительности.

Говоря о снижении потребности в строительных объемах (как одной из ключевых составляющих капитальных затрат) в случае использования МБР, следует упомянуть о возникновении другой значительной статьи расходов, которая и обеспечивает сокращение объемов — приобретение мембранных

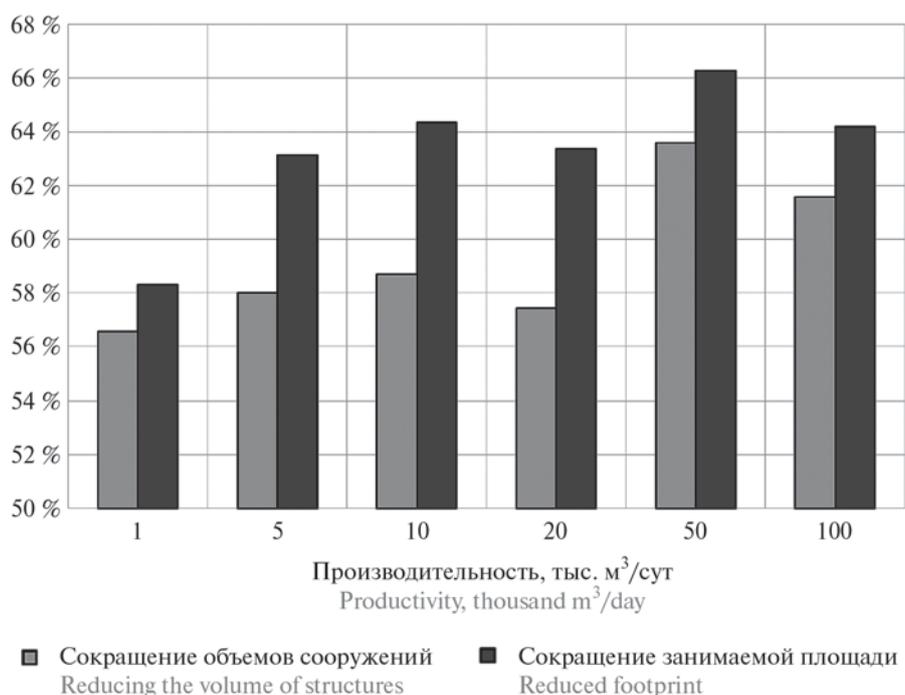


Рис. 3. Сокращение требуемых объемов и площадей при внедрении МБР

Fig. 3. Reduction of required volume and area with implementation of membrane module

модулей [17, 18]. При этом затраты на их приобретение можно условно отнести и к капитальным, т.е. осуществляемым на стадии строительства, и к эксплуатационным, поскольку в силу срока службы мембран (7–10 лет) в процессе эксплуатации будет возникать необходимость в их периодической замене. Рассчитаем примерную стоимость мембран C_m , необходимую для устройства мембранного биореактора на сооружениях с суточной производительностью $Q_{сут} = 1000 \text{ м}^3/\text{сут}$, по формуле:

$$C_m = \frac{Q_p \cdot 1000}{J} C_1, \text{ руб.}, \quad (1)$$

где Q_p — расчетный расход, $\text{м}^3/\text{ч}$, определяемый по формуле:

$$Q_p = \frac{Q_{сут}}{24} K_{gen.max}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (2)$$

где $K_{gen.max}$ — коэффициент неравномерности притока сточных вод, принимаемый в соответствии [9]. Для $Q_{сут} = 1000 \text{ м}^3/\text{сут}$ $K_{gen.max} = 2,06$. Тогда:

$$Q_p = \frac{1000}{24} \cdot 2,06 = 86, \text{ м}^3/\text{ч},$$

где C_1 — стоимость 1 м^2 мембранных модулей марки Kubota, принятая равной примерно $4000 \text{ руб.}/\text{м}^2$ [10]; J — удельный расход пермеата через мембрану, принятый равным $20 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Подставив в формулу (1) принятые значения, получим:

$$C_m = \frac{86 \cdot 1000}{20} \cdot 4000 = 17\,200\,000 \text{ руб.} = 17,2 \text{ млн руб.}$$

Используя формулу (1) при постоянных величинах C_1 и J и переменной величине Q_p (принятой с учетом коэффициентов неравномерности в соответствии с табл. 1 СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения»), получим примерные стоимости мембран на очистных сооружениях для рассмотренных в статье производительностей. Результаты рас-

четов стоимости представлены в табл. 4. Также в табл. 4 приведены величины удельных годовых затрат на приобретение мембран, отнесенных к 1 м^3 суточной производительности станции при учете срока службы мембран, равного 10 годам.

Из табл. 4 видно, что рассчитанные величины затрат весьма существенны, однако доля стоимости мембран в общих затратах сооружений будет снижаться по мере увеличения производительности. Кроме того, в настоящее время наблюдается тенденция к снижению стоимости мембранных модулей в связи с растущим количеством их производителей, что может в перспективе способствовать их более широкому применению.

Также в ходе расчета рассмотрены затраты электроэнергии, возникающие при эксплуатации очистных сооружений, в целом, и сооружений биологической очистки, в частности. Расход электроэнергии для станции очистки был получен укрупненно, однако для сооружений биологической очистки проведена детализация по технологическим нуждам. Так, для варианта 1 — традиционной схемы — учитывались расходы на аэрацию и внутренний рецикл иловой смеси, а также на эксплуатацию ВО, рецикл возвратного активного ила (ВАИ) и отвод ИАИ (табл. 5). Для варианта 2 — схемы с МБР — были учтены и расходы на аэрацию, рецикл ВАИ и отвод ИАИ, к которым добавились затраты энергии на откачку всего расхода очищаемой воды вакуум-насосами, а также затраты на подачу воздуха на обдув мембран (табл. 6). Именно последний пункт и обеспечивает существенное увеличение затрат электроэнергии при использовании МБР. При этом в табл. 5 и 6 приведены удельный расход и удельная стоимость электроэнергии на 1 м^3 производительности станции. Тариф принят для г. Москвы и составляет $4,96 \text{ руб. за } 1 \text{ кВтч}^4$.

⁴ Порядок определения цен (тарифов) на электрическую энергию (мощность). URL: <https://www.mosenergosbyt.ru/legals/tariffs-n-prices/determining-the-prices.php>

Табл. 4. Затраты на приобретение мембран
Table 4. Cost of purchasing membranes

Суточный расход $Q_{сут}$, $\text{м}^3/\text{сут}$ Subsistence costs Q_{day} , $\text{м}^3/\text{day}$	Расчетный расход Q_p , $\text{м}^3/\text{ч}$ Estimated costs Q_e , $\text{м}^3/\text{hour}$	Стоимость C_m , тыс. руб. Membrane value C_m , thousand rubles	Удельные затраты, тыс. руб./ м^3 год Unit costs, thousand rubles/ м^3 year
1000	86	17 200	1,72
5000	350	70 000	1,4
10 000	667	133 400	1,334
20 000	1308	261 600	1,308
50 000	3125	625 000	1,25
100 000	6125	1 225 000	1,225

Табл. 5. Затраты электроэнергии для технологической схемы по варианту 1

Table 5. Electricity consumption for the Option 1 process

Сооружение Construction	Расход электроэнергии, МВт ч/год, при производительности, тыс. м ³ /сут Electricity consumption, MW h/year, at productivity, thousand m ³ /day					
	1	5	10	20	50	100
Аэрация в аэротенке Aeration in the aerated lagoon	131	653	1300	2520	6700	13 100
Внутренний рецикл Internal recycling	12,8	65	128	250	647	1290
Рецикл ВАИ Recycle of returned active silt	4	19,1	39,2	85,4	190	377
Эксплуатация ВО Secondary sand operation	7,5	8,2	9,1	10,2	14,5	21,5
Отвод ИАИ Removal of excess active silt	0,1	0,7	1,4	2,7	6,8	13,5
Общая на биоочистку Total for bioremediation	155,4	746	1478	2868	7558	14 802
Общая для станции Common for the station	319,4	971,0	1758	3242	8194	15 839
Удельный расход электроэнергии, кВтч/м ³ Specific power consumption, kWh/m ³	0,87	0,53	0,48	0,44	0,45	0,43
Удельная стоимость электроэнергии, руб./м ³ Specific cost of electricity, rubles/m ³	4,33	2,64	2,39	2,19	2,24	2,14

Табл. 6. Затраты электроэнергии для технологической схемы по варианту 2

Table 6. Energy costs (option 2)

Сооружение Construction	Расход электроэнергии, МВт ч/год, при производительности, тыс. м ³ /сут Electricity consumption, MW h/year, at productivity, thousand m ³ /day					
	1	5	10	20	50	100
Аэрация в аэротенке Aeration in the aerated lagoon	120	444	931	1750	4370	8900
Рецикл ВАИ Recycle of returned active silt	12,5	62,5	125	249	622	1240
Аэрация на обдув мембран Aeration for membrane blowing	98,3	402	764	1300	2880	5480
Откачка пермеата Pumping out permeate	8,1	40,2	81	162	401	803
Отвод ИАИ Removal of excess active silt	0,1	0,6	1,1	2,26	5,6	11
Общая на биоочистку Total for bioremediation	239	949	1902	3463	8279	16 434
Общая для станции Common for the station	403	1174	2177	3838	8903	17 419
Удельный расход электроэнергии, кВтч/м ³ Specific power consumption, kWh/m ³	1,10	0,64	0,60	0,53	0,49	0,48
Удельная стоимость электроэнергии, руб./м ³ Specific cost of electricity, rubles/m ³	5,48	3,19	2,99	2,64	2,44	2,39

При анализе граничных значений производительности очистных сооружений, которые были рассмотрены в статье 1, и 100 тыс. м³/сут величины удельного расхода электроэнергии для них существенно отличаются для обеих схем. В случае с первой схемой — в 2 раза, со второй схемой — в 2,3 раза. Очевидно, что при малых расходах оборудование с большим энергопотреблением будет существенно влиять на общие энергозатраты, а по мере роста производительности влияние будет сокращаться. Если рассмотреть различия в величинах удельных затрат электроэнергии, то во всем диапазоне исследования этот показатель больше для схемы 2, при этом при производительности 1000 м³/сут разница составляет 26 %, а в дальнейшем снижается до 11 % при производительности 100 000 м³/сут. В целом, полученные при моделировании данные близки к ранее описанным сведениям [19, 20], однако, как и любые модельные показатели, требуют подтверждения на реальных объектах.

Таким образом, сопоставляя полученные результаты для двух схем очистки, можно сделать вывод о том, что по мере увеличения производительности разница между двумя технологиями очистки в энергопотреблении сокращается, при этом для схемы 1 все еще требуются значительно большие площади и объемы сооружений. В случае нового строительства это свидетельствует о том, что применение второго варианта позволит сделать сооружения более компактными; в случае реконструкции при должном

обосновании это даст возможность обеспечить большую производительность в имеющихся объемах сооружений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенных расчетов (в том числе с применением программного комплекса CapdetWorks 4.0) можно сделать следующие выводы:

- в ходе расчетов установлено, что применение мембранных биореакторов для илоразделения позволит снизить необходимые объемы емкостных сооружений на величину около 60 %;
- определено, что затраты на приобретение и обновление мембран являются значительной статьёй расходов, а удельная величина затрат (на приобретение рассмотренного типа мембран без учета дополнительного оборудования) составит 12–17 тыс. руб./м³ очищаемых сточных вод. При этом стоимость мембран за последнее время имеет тенденцию к снижению;
- выявлено, что использование мембран увеличивает удельные затраты электроэнергии на 10–25 % по сравнению с технологическими схемами, позволяющими добиться схожего качества очистки воды;
- определено, что применение мембранных технологий на стадии илоразделения может иметь значительный потенциал при реконструкции сооружений в условиях увеличения производительности и ограниченных возможностей для расширения площади.

ЛИТЕРАТУРА

1. Padrón-Páez J.I., De-León Almaraz S., Román-Martínez A. Sustainable wastewater treatment plants design through multiobjective optimization // *Computers & Chemical Engineering*. 2020. Vol. 1402. P. 106850. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2020.106850
2. Cossio C., Norrman J., McConville J., Mercado A., Rauch S. Indicators for sustainability assessment of small-scale wastewater treatment plants in low and lower-middle income countries // *Environmental and Sustainability Indicators*. 2020. Vol. 6. P. 100028 DOI: 10.1016/j.indic.2020.100028
3. Mao X., Myavagh P.H., Lotfikatouli S., Hsiao B.S., Walker H.W. Membrane Bioreactors for Nitrogen Removal from Wastewater: A Review // *Journal of Environmental Engineering*. 2020. Vol. 146. Issue 5. P. 03120002. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001682
4. Егорова Ю.А., Левин Д.И., Люшина Л.Ф., Пётропавловский С.А., Баженов В.И., Данилович Д.А. и др. Комплексная реконструкция городских очистных канализационных сооружений г. Самары // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2016. № 8. С. 80–88.
5. Martín de la Vega P.T., Jaramillo M.A., Martínez de Salazar E. Upgrading the biological nutrient removal process in decentralized WWTPs based on the intelligent control of alternating aeration cycles // *Chemical Engineering Journal*. 2013. Vol. 232. Pp. 213–220. DOI: 10.1016/j.cej.2013.07.051
6. Wang Q., Liang J., Zhao C., Bai Y., Liu R., Liu H. et al. Wastewater treatment plant upgrade induces the receiving river retaining bioavailable nitrogen sources // *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 263. P. 114478. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114478
7. Yang J., Chen B. Energy efficiency evaluation of wastewater treatment plants (WWTPs) based on data envelopment analysis // *Applied Energy*. 2021. Vol. 289. P. 116680. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116680
8. Кузьмин В.А., Ломинога О.А., Колоскова Е.Г. Внедрение мембранных технологий на канализационных очистных сооружениях пос. Молодежное // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2021. № 3. С. 26–32. DOI: 10.35776/VST.2021.03.05
9. Макиша Н.А. Моделирование реконструкции канализационных очистных сооружений при исполь-

зовании мембранных биореакторов // Экология урбанизированных территорий. 2020. № 2. С. 88–93 DOI: 10.24411/1816-1863-2020-12088

10. Abbasi N., Ahmadi M., Naseri M. Quality and cost analysis of a wastewater treatment plant using GPS-X and CapdetWorks simulation programs // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 284. P. 111993. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.111993

11. Arif U.A., Sorour M.T., Aly S.A. Cost analysis of activated sludge and membrane bioreactor WWTPs using CapdetWorks simulation program: Case study of Tikrit WWTP (middle Iraq) // Alexandria Engineering Journal. 2020. Vol. 59. Issue 6. Pp. 4659–4667. DOI: 10.1016/j.aej.2020.08.023

12. Доронин С.В., Харьков С.В. Реконструкция КОС для удаления биогенных элементов. Сюрпризы проектирования и пути снижения общих затрат // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2017. № 3 (111). С. 22–35.

13. Blandin G., Gautier C., Sauchelli Toran M., Monclús H., Rodriguez-Roda I., Comas J. Retrofitting membrane bioreactor (MBR) into osmotic membrane bioreactor (OMBR): A pilot scale study // Chemical Engineering Journal. 2018. Vol. 339. Pp. 268–277. DOI: 10.1016/j.cej.2018.01.103

14. Mannina G., Ni B.-J., Ferreira Rebouças T., Cosenza A., Olsson G. Minimizing membrane bioreactor environmental footprint by multiple objective optimization // Bioresource Technology. 2020. Vol. 302. P. 122824. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.122824

Поступила в редакцию 3 июля 2021 г.

Принята в доработанном виде 16 августа 2021 г.

Одобрена для публикации 25 августа 2021 г.

О Б АВТОРЕ: **Николай Алексеевич Макиша** — кандидат технических наук, доцент, директор научно-образовательного центра «Водоснабжение и водоотведение»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 644678, Scopus: 55841479500, ResearcherID: I-1562-2015, ORCID: 0000-0003-2567-4450; makishana@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Padrón-Páez J.I., De-León Almaraz S., Román-Martínez A. Sustainable wastewater treatment plants design through multiobjective optimization. *Computers & Chemical Engineering*. 2020; 1402:106850. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2020.106850

2. Cossio C., Norrman J., McConville J., Mercado A., Rauch S. Indicators for sustainability assessment of small-scale wastewater treatment plants in low and lower-middle income countries. *Environmental and Sustainability Indicators*. 2020; 6:100028. DOI: 10.1016/j.indic.2020.100028

15. Judd S., Turan F. Sidestream vs immersed membrane bioreactors: a cost analysis // Proceedings of the Water Environment Federation. 2018. Vol. 2018. Issue 10. Pp. 3722–3733. DOI: 10.2175/193864718825136008

16. Gil J.A., Túa L., Rueda A., Montaña B., Rodríguez M., Prats D. Monitoring and analysis of the energy cost of an MBR // Desalination. 2010. Vol. 250. Pp. 997–1001 DOI: 10.1016/j.desal.2009.09.089

17. Пупырев Е.И. Решение задач проектирования энергоэффективных сооружений очистки воды // Строительство и реконструкция. 2015. № 4 (60). С. 173–182.

18. Данилович Д.А. Энергосбережение и альтернативная энергетика на очистных сооружениях канализации // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 1. С. 9–20.

19. Wang H.-C., Cui D., Han J.-L., Cheng H.Y., Liu W.-Z., Peng Y.-Z. et al. A²O-MBR as an efficient and profitable unconventional water treatment and reuse technology: A practical study in a green building residential community // Resources, Conservation and Recycling. 2019. Vol. 150. P. 104418. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104418

20. Wang S., Zou L., Li H., Zheng K., Wang Y., Zheng G. et al. Full-scale membrane bioreactor process WWTPs in East Taihu basin: Wastewater characteristics, energy consumption and sustainability // Science of The Total Environment. 2020. Vol. 723. P. 137983. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137983

3. Mao X., Myavagh P.H., Lotfikatouli S., Hsiao B.S., Walker H.W. Membrane Bioreactors for Nitrogen Removal from Wastewater: A Review. *Journal of Environmental Engineering*. 2020; 146(5):103120002. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001682

4. Egorova I.A., Levin D.I., Liushina L.F., Petropavlovskii S.A., Bazhenov V.I., Danilovich D.A. et al. Integrated upgrade of the Samara municipal wastewater treatment facilities. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2016; 8:80-88. (rus.).

5. Martín de la Vega P.T., Jaramillo M.A., Martínez de Salazar E. Upgrading the biological nutrient removal

process in decentralized WWTPs based on the intelligent control of alternating aeration cycles. *Chemical Engineering Journal*. 2013; 232:213-220 DOI: 10.1016/j.cej.2013.07.051

6. Wang Q., Liang J., Zhao C., Bai Y., Liu R., Liu H. et al. Wastewater treatment plant upgrade induces the receiving river retaining bioavailable nitrogen sources. *Environmental Pollution*. 2020; 263:114478. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114478

7. Yang J., Chen B. Energy efficiency evaluation of wastewater treatment plants (WWTPs) based on data envelopment analysis. *Applied Energy*. 2021; 289:116680. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116680

8. Kuzmin V.A., Lominoga O.A., Koloskova E.G. Introduction of membrane technologies at the wastewater treatment facilities of Molodezhnoe settlement. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2021; 3:26-32. DOI: 10.35776/VST.2021.03.05 (rus.).

9. Makisha N.A. Modelling of wastewater treatment plant modernization in case of application of membrane bioreactors. *Ecology of Urban Territories*. 2020; 2:88-93. DOI: 10.24411/1816-1863-2020-12088 (rus.).

10. Abbasi N., Ahmadi M., Naseri M. Quality and cost analysis of a wastewater treatment plant using GPS-X and CapdetWorks simulation programs. *Journal of Environmental Management*. 2021; 284:111993. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.111993

11. Arif U.A., Sorour M.T., Aly S.A. Cost analysis of activated sludge and membrane bioreactor WWTPs using CapdetWorks simulation program: Case study of Tikrit WWTP (middle Iraq). *Alexandria Engineering Journal*. 2020; 59(6):4659-4667. DOI: 10.1016/j.aej.2020.08.023

12. Doronin S.V., Harkin S.V. Reconstruction of wastewater treatment plants for biological nutrient removal. Surprises design and ways to reduce overall costs. *Water Purification. Water Treatment. Water Supply*. 2017; 3:22-35. (rus.).

13. Blandin G., Gautier C., Sauchelli Toran M., Monclús H., Rodriguez-Roda I., Comas J. Retrofitting membrane bioreactor (MBR) into osmotic membrane bioreactor (OMBR): A pilot scale study. *Chemical Engineering Journal*. 2018; 339:268-277. DOI: 10.1016/j.cej.2018.01.103

14. Mannina G., Ni B.-J., Ferreira Rebouças T., Cosenza A., Olsson G. Minimizing membrane bioreactor environmental footprint by multiple objective optimization. *Bioresource Technology*. 2020; 302:122824. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.122824

15. Judd S., Turan F. Sidestream vs immersed membrane bioreactors: a cost analysis. *Proceedings of the Water Environment Federation*. 2018; 2018(10):3722-3733. DOI: 10.2175/193864718825136008

16. Gil J.A., Túa L., Rueda A., Montaña B., Rodríguez M., Prats D. Monitoring and analysis of the energy cost of an MBR. *Desalination*. 2010; 250:997-1001. DOI: 10.1016/j.desal.2009.09.089

17. Pupyrev E.I. The task of designing energy efficient buildings water treatment. *Building and Reconstruction*. 2015; 4(60):173-182. (rus.).

18. Danilovich D.A. Energy conservation and alternative power sources at the wastewater treatment facilities. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2011; 1:9-20. (rus.).

19. Wang H.-C., Cui D., Han J.-L., Cheng H.Y., Liu W.-Z., Peng Y.-Z. et al. A²O-MBR as an efficient and profitable unconventional water treatment and reuse technology: A practical study in a green building residential community. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019; 150:104418. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104418

20. Wang S., Zou L., Li H., Zheng K., Wang Y., Zheng G. et al. Full-scale membrane bioreactor process WWTPs in East Taihu basin: Wastewater characteristics, energy consumption and sustainability. *Science of The Total Environment*. 2020; 723:137983. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137983

Received July 3, 2021.

Adopted in revised form on August 16, 2021.

Approved for publication on August 25, 2021.

BIONOTES: Nikolay A. Makisha — Candidate of Technical Science, Associate Professor, Director of Research and Education Centre “Water supply and sewage”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 644678, Scopus: 55841479500, ResearcherID: I-1562-2015, ORCID: 0000-0003-2567-4450; makishana@mgsu.ru.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК 332.82

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1088-1094

Циклограмма реновации

Л.В. Киевский¹, Я.И. Киевский²

¹ Научно-проектный центр «Развитие города» (НПЦ «Развитие города»); г. Москва, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Относительно новая форма преобразования территории в сложившейся городской застройке, реновация кварталов требует пристального научного изучения и методического обоснования. Реновируемые кварталы, как и проекты строительства новых домов, имеют индивидуальные особенности и характеристики.

Материалы и методы. Для исследования фактической продолжительности этапов создания объектов по программе реновации в НПЦ «Развитие города» сформирована специальная база данных, в которую по состоянию на 15.05.2021 года включено 313 объектов, задействованных в программе реновации. Выполнена скрупулезная верификация указанной базы. В результате в верифицированной базе сохранены 122 объекта с разбросом значений продолжительности строительства от 11 до 43,2 мес. Использованы материалы информационной системы обеспечения градостроительной деятельности Москвы. Исходные материалы позволили выделить ряд характерных этапов в программе реновации по каждому объекту.

Результаты. С целью анализа проектной продолжительности строительства совокупность объектов разделена на две части: ввод в 2021 г. и ввод в последующие годы. Для каждой части построены гистограммы распределения продолжительности строительства домов при реновации и доказано, что соблюдается закон нормального распределения. Представлена схематическая модель процессов реновации с кратными продолжительностями процессов. Укрупненно продолжительность проектирования (стадия проект) может занимать один год, строительство — два года, а объединенные стадии: подготовка документов, переселение и снос ориентировочно займут один год. Этот четырехлетний цикл волны затем повторяется необходимое число раз. Представлен календарный план реновации для трех объектов волны с выделением ведущего потока.

Выводы. Несмотря на значительное разнообразие реновируемых кварталов и проектов строительства новых домов, традиционное поточное строительство с выделением характерных этапов возможно. Для крупных подрядных организаций реально сформировать кратноритмичный объектный поток с выделением в качестве ведущего потока этапа строительства и рассчитать циклограмму реновации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: реновация, кратноритмичный поток, циклограмма, эффективность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Киевский Л.В., Киевский Я.И. Циклограмма реновации // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 8. С. 1088–1094. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1088-1094

Renovation cycle diagram

Leonid V. Kievskiy¹, Yakov I. Kievskiy²

¹ Scientific Project Center “City Development”; Moscow, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. A relatively new form of transformation of the territory in the current urban development, the renovation of quarters, requires close scientific study and methodological justification. Renovated neighborhoods, as well as projects for the construction of new houses, have individual features and characteristics. The authors hypothesize that, despite the variety of characteristics of renovated neighborhoods and projects for the construction of new houses, traditional in-line construction with the allocation of characteristic stages is possible.

Materials and methods. To study the actual duration of the stages of creating objects under the renovation program (which is necessary to identify objects of similar duration), a special database was formed in the Scientific and Project Center “City Development”. As of 15.05.2021, 313 objects involved in the renovation program are included in this special database. A thorough verification of the specified database was performed. As a result, 122 objects with a spread of construction duration values from 11 months to 43.2 months are stored in the verified database. In addition, the materials of the information system for ensuring urban planning activities (ISOGD) of Moscow were used. The initial materials allowed us to identify a number of characteristic stages in the renovation program for each object.

Results. To analyze the design duration of construction, the set of objects is divided into 2 parts: commissioning in 2021 and commissioning in subsequent years. For each part, histograms of the distribution of the duration of construction of houses

during renovation are constructed and it is proved that the law of normal distribution is observed. A schematic model of renovation processes with multiple process durations is presented. The overall duration of the design (project stage) can take 1 year, construction — 2 years, and the combined stages: preparation of documents, relocation and demolition, will approximately take 1 year. This four-year wave cycle is then repeated the required number of times. The calendar plan of renovation for three wave objects with the allocation of the leading stream is presented. The ratio of flow processes during renovation is most clearly reflected in the constructed cyclogram of a multi-rhythmic object flow modified for renovation conditions. Combined schedules of renovation of in-line construction are constructed.

Conclusions. Despite the considerable variety of renovated neighborhoods and projects for the construction of new houses, the authors of the article prove that traditional in-line construction with the allocation of characteristic stages is possible. For large contracting organizations, it is realistic to form a multi-rhythmic object flow with the allocation of the construction stage as the leading flow and calculate the renovation cyclogram.

KEYWORDS: renovation, multi-rhythmic flow, cyclogram, efficiency

FOR CITATION: Kievskiy L.V., Kievskiy Ya.I. Renovation cycle diagram. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(8):1088-1094. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1088-1094 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Специфика реновации, крупнейшего социального и инвестиционно-строительного проекта, активно реализуемого в Москве, связана со следующими факторами [1–12]: непосредственное участие городского бюджета в преобразовании сложившейся застройки; строительство новых жилых домов на месте сноса некомфортного жилья; добавление в комплексный процесс преобразования, кроме проектирования и строительства, этапов оформления документов для переселения застроенных территорий; переселение и снос; персонализированное проектирование новых домов по квартирографии для будущих переселенцев. Если рассматривать проектирование, переселение и снос в комплексном процессе реновации как неотъемлемые организационно-технологические процессы, аналогичные строительным процессам или организационным перерывам, то возникает вопрос, возможно ли в условиях реновации поточное строительство? Авторы полагают организацию объектных потоков при реновации реальной, что особенно важно для крупных подрядных организаций, объемы работ которых в районах реновации составляют несколько сотен тысяч квадратных метров нового жилья. Выгоды поточного строительства при этом устанавливаются долговременной загрузкой строительных мощностей, эффектами специализации и экономии ресурсов, возможностью не начинать все стройки сразу, а выстроить их в определенную очередь по мере переселения и сноса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования фактической продолжительности этапов создания объектов по программе реновации (что необходимо для выявления объектов, близких по продолжительности) в Научно-проектном центре «Развитие города» сформирована [13, 14] специальная база данных. Исходные материалы для нее представлены Фондом реновации Москвы, Департаментами строительства и градостроительной политики города Москвы. Кроме того, использованы сведения информационной системы обеспечения

градостроительной деятельности (ИСОГД) Москвы. Исходная информация позволяет выделить несколько этапов в программе реновации по каждому объекту: проектирование объекта (от начала проектирования до получения положительного заключения Мосгорэкспертизы и следующего за этим решения заместителя мэра Москвы по вопросам градостроительной политики и строительству об утверждении проекта); строительство (от выдачи разрешения на строительство до ввода объекта в эксплуатацию); организационного периода между вводом и началом заселения (регистрация новой недвижимости, оформление документов на переселение); заселение; снос и подготовка площадки.

В специальную базу данных по состоянию на 15.05.2021 г. включено 313 объектов, задействованных в программе реновации. Для обоснования возможности организации поточного строительства при реновации выполнена скрупулезная верификация указанной базы. Исключены случайные объекты, например, жилой дом на Русаковской ул., д. 6 с коммуникациями по строительному объекту $T_{\text{стр}} = 1,8$ мес.; 23 введенных объекта, продолжительность строительства которых не указана в исходной базе, или имеются неполные сведения. Удалены также высотные объекты и разноэтажные комплексы, которые не могут использоваться для поточного строительства (Люблинская ул., стр. 13 общей площадью 138,5 тыс. м²; Люблинская ул., вл. 72, корп. 4 общей площадью 87,9 тыс. м²; Люблинская ул., вл. 72, корп. 21 с этажностью 25 этажей; 2-я Институтская ул., вл. 6, корп. 2 с этажностью 33 этажа; Новохоловская ул., кв. 80, где прекращено право на земельный участок; ул. Петра Алексева, вл. 12 (разноэтажный комплекс) и некоторые другие. Из аналитической части исключены дома заказчика КП «УГС» (которые используются в программе, но запроектированы, как правило, без должной квартирографии) — 26 домов. В результате в верифицированной базе сохранены 122 объекта с разбросом значений продолжительности строительства от 11 до 43,2 мес. Среднее значение продолжительности строительства по верифицированной базе составило 23,96 мес., медианное — 22,3 мес. Среди 122

объектов имеются 9 домов второй волны реновации, 52 дома ввода 2021 г. и 70 домов запланированного ввода на 2022–2023 гг. Продолжительность строительства определена по заключениям Мосгорэкспертизы на основе решений проектов организации строительства. Для анализа проектной продолжительности строительства совокупность из 122 объектов разделена на две части: ввод в 2021 г. — 52 объекта и ввод в последующие годы — 70 объектов. Для каждой части выполнено распределение значений по диапазонам (рис. 1) и доказано, что соблюдается закон нормального распределения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гистограммы показывают, что медианное значение продолжительности для ряда 1, соответствующего 2021 г., составляет 23 мес. (практически

2 года), для последующего периода гистограмма носит более плавный характер, а медианное значение продолжительности снижается до 22,3 мес. (на 3 %). Это снижение может быть объяснено использованием в начальные годы не самых удобных и стесненных стартовых площадок, а также активной работой Фонда реновации по общей организации процессов. При этом асимметричность распределения увеличилась с 0,00593 до 0,90. В интервал 19–27 мес. (1,6–2,25 года) попали по двум группам 87 объектов (71 % от общего числа).

Схематическая модель процессов реновации с кратными продолжительностями процессов представлена на рис. 2. Укрупненно продолжительность проектирования (стадия проект) может занимать один год, строительство — два года, а объединенные стадии: подготовка документов, переселение и снос, ориентировочно займут один год. Этот четырехлет-

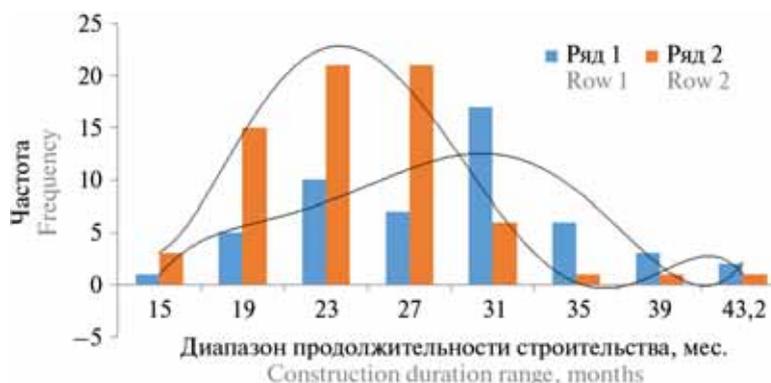


Рис. 1. Гистограммы распределения продолжительности строительства домов при реновации: ряд 1 — 2021 г. ввода; ряд 2 — 2022 и 2023 гг. ввода

Fig. 1. Histograms of the distribution of the duration of construction of houses during renovation: row 1 — 2021 year of commissioning; row 2 — 2022 and 2023 year of commissioning

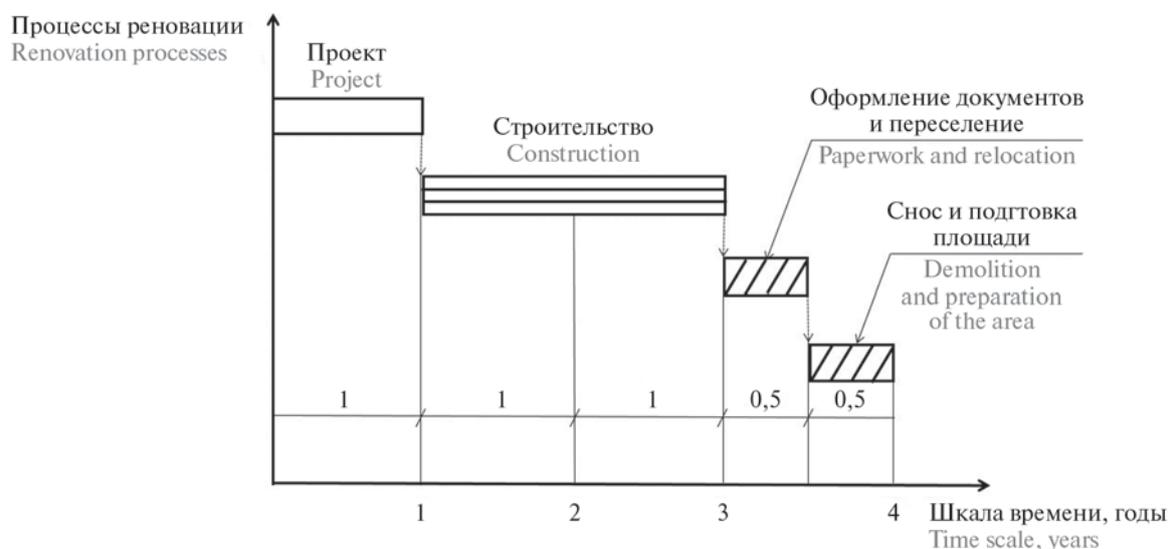


Рис. 2. Схема реновации

Fig. 2. Renovation scheme

ний цикл волны затем повторяется необходимое число раз.

Календарный план реновации для трех объектов волны с выделением ведущего потока — строительство будет с учетом рис. 2 выглядеть так, как показано на рис. 3.

Реализация представленного на рис. 3 объектного потока становится принципиально возможной,

если заранее (вне рассматриваемых моделей) сформированы адресные волны переселения, которые определяют маршруты переезда жителей и задают квартирографию для проектирования. Фактически проектирование, первый процесс создания каждого объекта, не прекращается с началом строительства, но продолжается, переходя от стадии проекта к рабочему проектированию. Переход с объекта

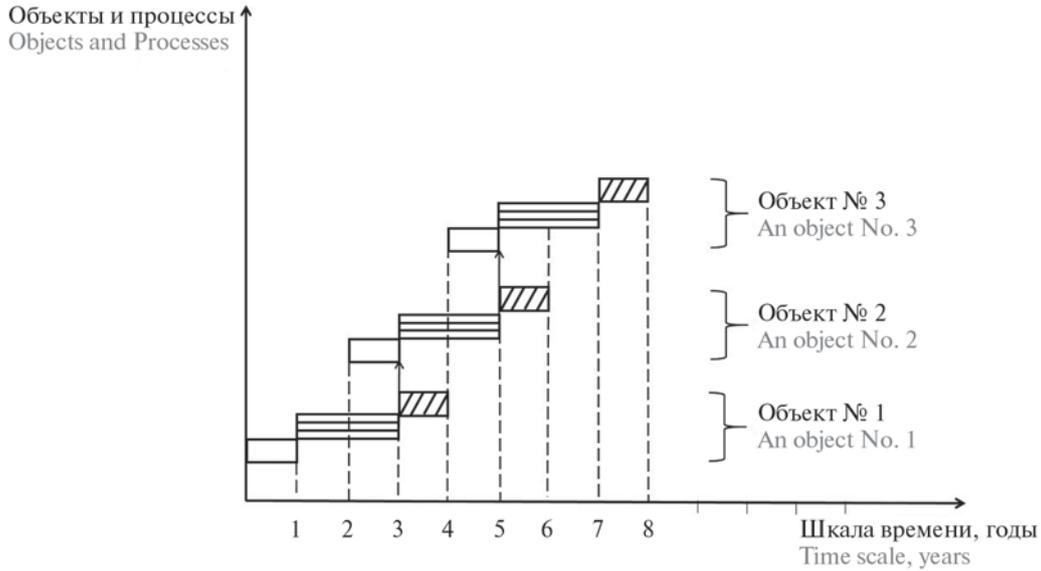


Рис. 3. Календарный план реновации для трех объектов

Fig. 3. Renovation schedule for three objects

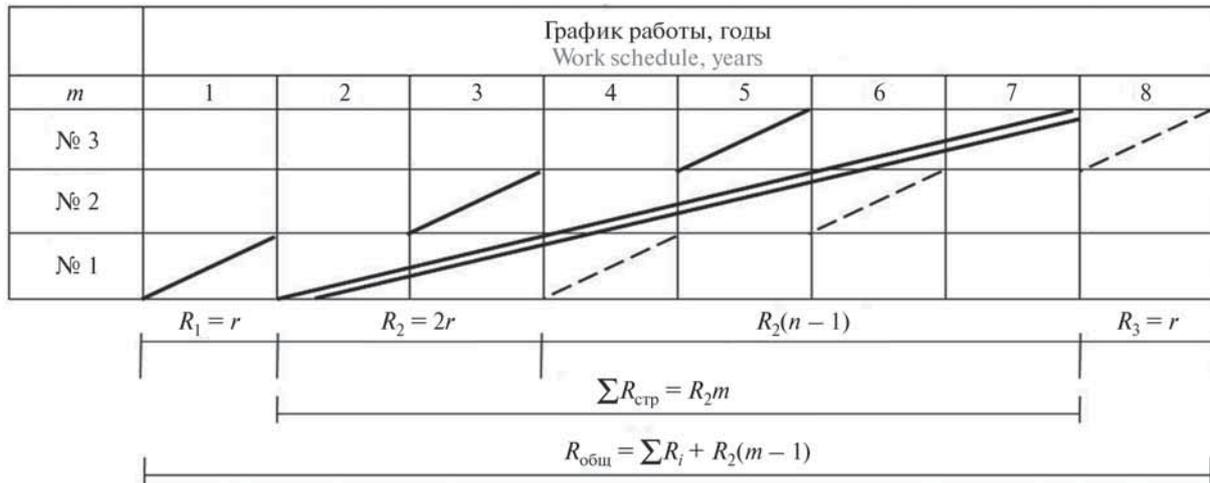


Рис. 4. Циклограмма реновации: / — проектирование; // — строительство; / — переселение и снос; *m* — количество объектов; *n* — количество процессов; *r* — ритм потока (минимальный по всем процессам); R_1 — продолжительность проектирования объекта; R_2 — продолжительность строительства объекта; R_3 — продолжительность переселения в построенный объект и сноса переселенных домов; $\sum R_{стр}$ — суммарная продолжительность поточного строительства по всем объектам; $R_{общ}$ — суммарная продолжительность процессов реновации при поточном строительстве

Fig. 4. Renovation cycle diagram: / — design; // — construction; / — relocation and demolition; *m* — number of objects; *n* — number of processes; *r* — flow rhythm (minimum for all processes); R_1 — duration of the design of the facility; R_2 — duration of the construction of the facility; R_3 — duration of relocation to the constructed facility and demolition of relocated houses; $\sum R_{con}$ — total duration of in-line construction for all facilities; R_{gen} — the total duration of the renovation processes during in-line construction

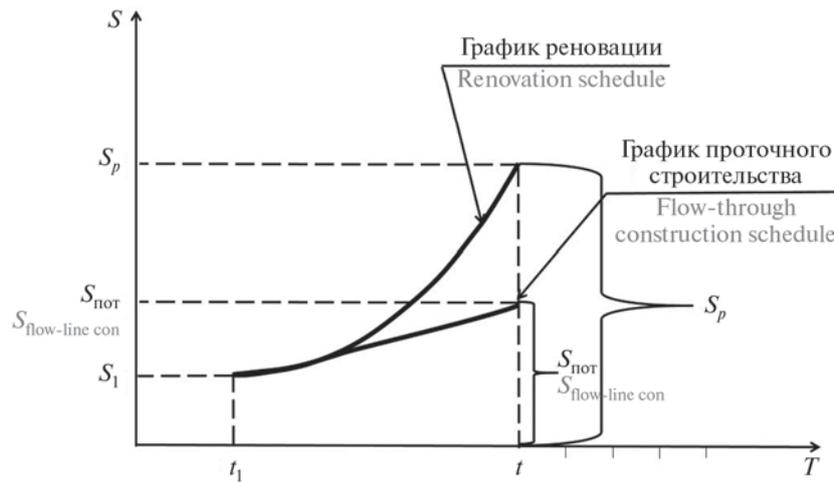


Рис. 5. Совмещенные графики реновации поточного строительства

Fig. 5. Combined renovation schedules of flow-line construction

на объект подрядчик осуществляет после завершения строительства, а переселение и снос — дискретно по мере ввода домов в эксплуатацию. Наиболее наглядно соотношение поточных процессов при реновации отражается в циклограмме кратноритмичного объектного потока, модифицированного под условия реновации (рис. 4)

График поточного строительства (рис. 5), в свою очередь, представляет собой касательную к кривой реновации.

Как следует из циклограммы реновации, процесс поточного строительства развивается во времени по линейному закону, а суммарный ввод объектов рассчитывается по формуле

$$S_{\text{пот}} = V_j m, \quad (1)$$

где V_j — объем строительства одного дома. Вместе с тем, согласно работам специалистов НПЦ «Развитие города» [15–19], процессы реновации (график суммарного ввода по времени) развиваются по параболическому закону. Это связано с тем, что на каждом шаге волны (при переходе к каждому следующему объекту для района реновации) объем ввода увеличивается. При постоянных параметрах реновации суммарный ввод рассчитывается по формуле:

$$S_p = \frac{S_1 - (q^{t-1})}{q-1}, \quad (2)$$

где

$$q = \frac{K_{\text{рен}}(1 - K_{\text{прод}})}{K_{\text{пер}}}. \quad (3)$$

В формулах (2), (3) приняты следующие обозначения: S_p — суммарный ввод (сумма первых t -членов геометрической прогрессии); S_1 — стартовый ввод в первый год реализации программы реновации; $K_{\text{рен}}$ — отношение вводимой площади к сносимой; $K_{\text{прод}}$ — отношение продаваемой площади

к сносимой; $K_{\text{пер}}$ — отношение площади, предоставляемой переселенцам, к сносимой.

На рис. 5 представлен график реновации, рассчитанный по средним для Москвы параметрам реновации (принятым постоянными): $K_{\text{рен}} = 2,6$; $K_{\text{прод}} = 0,2$; $K_{\text{пер}} = 1,3$; что соответствует знаменателю геометрической прогрессии $q = 1,6$.

Доля поточного строительства в программе реновации может характеризовать эффективность организации этих процессов. Она рассчитывается по формуле:

$$\Theta = \frac{S_{\text{пот}}}{S_p}. \quad (4)$$

Подставим в формулу (4) выражение (1) и (2), получим расчетную формулу эффективности

$$\Theta = \frac{V_j m (q-1)}{S_1 (q^t - 1)}. \quad (5)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализируя полученную формулу, видно, что эффективность будет возрастать при: увеличении значения m (роста количества домов в кратноритмичном потоке); увеличении соотношения V_j/S_1 (увеличении объема строительства домов в потоке по сравнению со стартовым вводом). Кроме того, для повышения эффективности возможна организация по мере роста волны реновации второго и последующих потоков строительства домов.

Дальнейшим продолжением данных исследований может быть изучение и анализ дополнительных факторов организации поточного строительства, позволяющих сокращать сроки ввода объектов при реализации программы реновации. Возможна детализация циклограммы при дифференциации строительства на подземную часть, надземную часть и отделку.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Киевский Л.В., Каргашин М.Е.* Реновация по кварталам (методические вопросы) // Жилищное строительство. 2018. № 4. С. 15–25.
2. *Тихомиров С.А., Киевский Л.В., Кулешова Э.И., Костин А.В., Сергеев А.С.* Моделирование градостроительного процесса // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 9. С. 51–55.
3. *Киевский И.Л., Тихомиров С.А.* Организация комплексной реконструкции жилых районов (на примере г. Москвы) с использованием инфографической модели // Развитие города: сб. науч. тр. 2006–2014 гг. 2014. С. 398–404.
4. *Киевский И.Л., Киевский Л.В., Арзунов С.В.* Множественные эффекты реновации // Реновация. Крупномасштабный городской проект рассредоточенного строительства: монография о научно-методических подходах и начале реализации программы / под ред. И.Л. Киевского. М.: Русская школа, 2018. С. 182–191.
5. *Kievskiy I.L.* Assessment of major trends in the development of financial economic instruments in Moscow used in preparation for the implementation of large-scale urban dispersed construction projects // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. Issue 12. Pp. 105–115.
6. *Kievskiy I.L.* Predicting building dilapidation in order to ensure efficient planning and management of the implementation of large-scale urban projects of dispersed construction // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. Issue 13. Pp. 113–118.
7. *Васканьяц Ю.Ю.* Некоторые приоритетные вопросы регулирования градостроительной деятельности // Уникальные исследования XXI века. 2015. № 5 (5). С. 40–44.
8. *Хоркина Ж.А., Леонов В.В.* Целесообразность реализации программы реновации жилищного фонда в городе Москве // Реновация. Крупномасштабный городской проект рассредоточенного строительства: монография о научно-методических подходах и начале реализации программы реновации. 2018. С. 34–56.
9. *Груздев В.М.* Основы градостроительства и планировка населенных мест. Нижний Новгород: ННГАСУ, 2017. 105 с.
10. *Дрожжин Р.А.* Реновация промышленных территорий // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2015. № 1 (11). С. 84–86.
11. *Копотилова А.С.* Особенности строительства в условиях плотной городской застройки // Молодой ученый. 2017. № 49 (183). С. 59–61.
12. *Киевский Л.В., Арсеньев С.В., Каргашин М.Е.* Многофакторная организационно-экономическая модель реновации // Реновация. Крупномасштабный городской проект рассредоточенного строительства: монография о научно-методических подходах и начале реализации программы реновации. 2018. С. 114–129.
13. *Киевский И.Л.* Управление и координация крупномасштабными городскими проектами рассредоточенного строительства в городе Москве на примере программы реновации // Реновация. Крупномасштабный городской проект рассредоточенного строительства: монография о научно-методических подходах и начале реализации программы реновации. 2018. С. 11–13.
14. *Kievskiy I.L.* Evaluating the effects of the implementation of large-scale projects of dispersed construction and their impact on the demand for construction machinery and mechanisms // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. Issue 12. Pp. 1278–1290.
15. *Киевский И.Л., Гришутин И.Б., Киевский Л.В.* Рассредоточенное переустройство кварталов (предпроектный этап) // Жилищное строительство. 2017. № 1–2. С. 23–28.
16. *Киевский Л.В.* Прикладная организация строительства // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 3 (102). С. 253–259. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.253-259
17. *Киевский Л.В.* Математическая модель реновации // Жилищное строительство. 2018. № 1–2. С. 3–7.
18. *Киевский Л.В., Арсеньев С.В., Каргашин М.Е.* Алгоритмы реновации // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 8. С. 36–43. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.08.36-43
19. *Киевский Л.В., Каргашин М.Е., Пархоменко М.И., Сергеева А.А.* Организационно-экономическая модель реновации // Жилищное строительство. 2018. № 3. С. 47–55.

Поступила в редакцию 11 июня 2021 г.

Принята в доработанном виде 22 июля 2021 г.

Одобрена для публикации 29 июля 2021 г.

О Б АВТОРАХ: **Леонид Владимирович Киевский** — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, заслуженный строитель РФ; **Научно-проектный центр «Развитие города» (НПЦ «Развитие города»);** 129090, г. Москва, пр-т Мира, д. 19, стр. 3; РИНЦ ID: 44017969, Scopus: 57113714800, ORCID: 0000-0001-6308-99-44; mail@dev-city.ru;

Яков Ильич Киевский — студент Института строительства и архитектуры (ИСА); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; mail@dev-city.ru.

REFERENCES

1. Kievskiy L.V., Kargashin M.E. Renovation by city blocks (methodological issues). *Housing Construction*. 2018; 4:15-25. (rus.).
2. Tikhomirov S.A., Kievskiy L.V., Kuleshova E.I., Kostin A.V., Sergeev A.S. Modeling of town-planning process. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 9:51-55. (rus.).
3. Kievskiy I.L., Tikhomirov S.A. Organization of complex reconstruction of residential areas (on the example of Moscow) using an infographic model. *City development: collection of articles. scientific. tr. 2006-2014*. 2014; 398-404. (rus.).
4. Kievskiy I.L., Kievskiy L.V., Argunov S.V. Multiple effects of renovation. *Renovation. Large-scale urban project of dispersed construction: a monograph on scientific and methodological approaches and the beginning of the implementation of the program* / ed. I.L. Kievskiy. Moscow, Russian school, 2018; 182-191. (rus.).
5. Kievskiy I.L. Assessment of major trends in the development of financial economic instruments in Moscow used in preparation for the implementation of large-scale urban dispersed construction projects. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018; 9(12):105-115.
6. Kievskiy I.L. Predicting building dilapidation in order to ensure efficient planning and management of the implementation of large-scale urban projects of dispersed construction. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018; 9(13):113-118.
7. Vaskanyats Yu.Yu. Some priority issues of urban planning regulation. *Unique research of the XXI century*. 2015; 5(5):40-44. (rus.).
8. Khorkina Zh.A., Leonov V.V. Feasibility of implementing the program for the renovation of the housing stock in the city of Moscow. *Renovation. Large-scale urban project of dispersed construction: a monograph on scientific and methodological approaches and the beginning of the implementation of the renovation program*. 2018; 34-56. (rus.).
9. Gruzdev V.M. *Basics of urban planning and planning of settlements*. Nizhny Novgorod, NNGASU, 2017; 105. (rus.).
10. Drozhzhin R.A. Renovation of industrial areas. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2015; 1(11):84-86. (rus.).
11. Kopotilova A.S. Features of construction in conditions of dense urban development. *Young Scientist*. 2017; 49(183):59-61. (rus.).
12. Kievskiy L.V., Arseniev S.V., Kargashin M.E. Multifactor organizational and economic model of renovation. *Renovation. Large-scale urban project of dispersed construction: a monograph on scientific and methodological approaches and the beginning of the implementation of the renovation program*. 2018; 114-129. (rus.).
13. Kievskiy I.L. Management and coordination of large-scale urban projects of dispersed construction in the city of Moscow on the example of the renovation program. *Renovation. Large-scale urban project of dispersed construction: a monograph on scientific and methodological approaches and the beginning of the implementation of the renovation program*. 2018; 11-13. (rus.).
14. Kievskiy I.L. Evaluating the effects of the implementation of large-scale projects of dispersed construction and their impact on the demand for construction machinery and mechanisms. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018; 9(12):1278-1290.
15. Kievskiy I.L., Grishutin I.B., Kievskiy L.V. Decentralized rearrangement of city blocks (concept design stage). *Housing Construction*. 2017; 1-2:23-28. (rus.).
16. Kievskiy L.V. Applied Organization of Construction. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12(3):(102):253-259. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.253-259. (rus.).
17. Kievskiy L.V. A mathematical model of renovation. *Housing Construction*. 2018; 1-2:3-7. (rus.).
18. Kievskiy L.V., Arsenyev S.V., Kargashin M.E. Algorithms for renovation. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 8:36-43. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.08.36-43 (rus.).
19. Kievskiy L.V., Kargashin M.E., Parkhomenko M.I., Sergeeva A.A. An organizational-economic model of renovation. *Housing Construction*. 2018; 3:47-55. (rus.).

Received June 11, 2021.

Adopted in revised form on July 22, 2021.

Approved for publication on July 29, 2021.

BIONOTES: **Leonid V. Kievskiy** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Research Scientist, Honored Builder of the Russian Federation; **Scientific Project Center “City Development”**; build. 3, 19 Mira avenue, Moscow, 129090, Russian Federation; ID RISC: 44017969, Scopus: 57113714800, ORCID: 0000-0001-6308-99-44; mail@dev-city.ru;

Yakov I. Kievskiy — student of the Institute of Civil Engineering and Architecture; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; mail@dev-city.ru.

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 указываются 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 должно 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. Фамилия²...

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 аннотации.**

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. Фамилия²... 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.

Віonotes: **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.

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

(наименование банка получателя платежа)

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 637,00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2021 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Извещение

Кассир

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма платежа 3 822 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

(наименование банка получателя платежа)

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 637,00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2021 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Квитанция

Кассир

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма платежа 3 822 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 14-23), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>



УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736X29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

(наименование банка получателя платежа)

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2021 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736X29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

(наименование банка получателя платежа)

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2021 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 14-23), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

