

ISSN 2227-2917 (print)
ISSN 2500-154X (online)

12+



IZVESTIYA VUZOV
Investitsii
Stroitelstvo
Nedvizhimost

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ
ИНВЕСТИЦИИ
СТРОИТЕЛЬСТВО
НЕДВИЖИМОСТЬ

Том 13 № 2
2023

ISSN 2227-2917 (print)
2500-154X (online)

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION



ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

IRKUTSK NATIONAL RESEARCH TECHNICAL UNIVERSITY

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ИНВЕСТИЦИИ. СТРОИТЕЛЬСТВО. НЕДВИЖИМОСТЬ

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES
INVESTMENT. CONSTRUCTION. REAL ESTATE

Izvestiya vuzov
Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost

Том 13 № 2
Vol.



ИЗДАТЕЛЬСТВО
Иркутского национального исследовательского
технического университета

PUBLISHERS
of Irkutsk National Research Technical University
2023



В журнале опубликованы статьи ученых из России и зарубежья, посвященные научным результатам в области теоретических и прикладных проблем строительства, архитектуры, экономики и управления. Статьи объединены в три тематических блока: Экономика и управление; Технические науки. Строительство; Архитектура. Дизайн.

Издание предназначено для научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов вузов, специалистов инвестиционно-строительной сферы, государственных и муниципальных органов власти.

Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный ВАК Минобразования России

Журнал включен в следующие базы данных: EBSCO Publishing Databases, ВИНТИ РАН, система Российского индекса научного цитирования, представлен в электронной библиотеке «Cyberleninka», библиотеке Oxford, Directory of Open Access Journals (DOAJ) и описан в Ulrich's Periodicals Directory.

Журнал «Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость» реферируется и рецензируется.

Сведения о журнале можно найти на сайте в Интернете: <http://www.istu.edu>

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство ПИ № ФС77-62787 от 18 августа 2015 г.

Учредитель-издатель:

ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет

Подписной индекс в ООО «Урал-Пресс» - 41511

Адрес ООО «Урал-Пресс»:

620026, Свердловская область, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, д. 130

Адрес учредителя, издателя и редакции:

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

e-mail: izv_isn@istu.edu

При перепечатке и цитировании ссылка на журнал
«Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость» обязательна

Авторы опубликованных статей несут ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, экономико-статистических данных и прочих сведений. Компьютерный макет сборника составлен из оригинальных авторских файлов.

ISSN 2227-2917 (print)
2500-154X (online)

In this journal we published the articles of Russian and foreign scientists, which are dedicated to scientific results in the sphere of theoretical and applied problems of development, architecture, economics and management. The articles are combined into three topical units: Economics and management; Technical sciences, Construction; Architecture, Design.

The publication is for staff scientists, teachers, post-graduate students and students of universities, specialists in investment and building sphere, government and municipal authorities.

The journal is included in the list of the leading scientific journals and publications, where the key scientific results of doctoral (candidate's) theses approved by the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Ministry of Education are to be published

The Journal is indexing in EBSCO Publishing Databases, VINITI Database (Referativnyi Zhurnal), Russian Science Citation Index, included in the digital scientific library Cyberleninka, University OXFORD, Directory of Open Access Journals (DOAJ) and is described in Ulrich's Periodicals Directory.

The journal "Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate" is abstracted and reviewed.

Information about the journal you can find on the site in the Internet: <http://www.istu.edu>

The journal is registered with the Federal Agency for Supervision of Communications, Information Technologies and Mass Media (Roskomnadzor).
Certificate of registration № ПИ № ФС77-62787 of 18 August, 2015.

Founder, publisher: FSBEIHE Irkutsk National Research Technical University

The subscription code in Ural-Press LLC: 41511
The postal address of Ural-Press LLC:
130 Mamin-Sibiryak St.,
Yekaterinburg, 620026, Russia

Address of the founder, publisher and editorial office:
83 Lermontov St., Irkutsk 664074
e-mail: izv_isn@istu.edu

Reference to the journal «Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate» is obligatory while reprinting and quotation

The authors of submitted materials are responsible for the selection and accuracy of facts, quotations, economic and statistical data and other information. Computer model of a journal is compiled of original authors' files

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Пешков В.В., главный редактор, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой экспертизы и управления недвижимостью Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Российская Федерация)

Чупин В.Р., заместитель главного редактора, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой городского строительства и хозяйства Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Российская Федерация)

Афанасьев А.А., доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, профессор кафедры строительного производства Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (г. Москва, Российская Федерация)

Батмунх Сэрээтэр, доктор технических наук, профессор, академик Монгольской Академии наук, директор Института теплотехники и промышленной экологии Академии наук Монголии, заведующий кафедрой тепловых электрических станций Монгольского государственного университета науки и технологии (г. Улан-Батор, Монголия)

Беккер А.Т., доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, профессор Инженерной школы Дальневосточного федерального университета (г. Владивосток, Российская Федерация)

Вальтер Фогт, доктор технических наук, специалист по планированию транспорта Университета г. Штутгарт (Федеративная Республика Германия)

Васильев Ю.Э., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительства и эксплуатации дорог Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (г. Москва, Российская Федерация)

Гребенюк Г.И., доктор технических наук, профессор, советник РААСН, заведующий кафедрой строительной механики Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (г. Новосибирск, Российская Федерация)

Димитра Николау, доктор архитектуры, профессор отдела городского и регионального планирования Архитектурной школы Афинского национального технического университета (г. Афины, Греческая Республика)

Ерофеев В.Т., доктор технических наук, профессор, академик РААСН, заведующий кафедрой строительных материалов и технологий Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева (г. Саранск, Республика Мордовия, Российская Федерация)

Ефимов А.В., доктор архитектуры, профессор, заведующий кафедрой дизайна архитектурной среды Московского архитектурного института, лауреат Государственной премии РФ, заслуженный деятель искусств (г. Москва, Российская Федерация)

Збигнев Войчицки, доктор технических наук, профессор кафедры гражданского строительства Вроцлавского технологического университета (г. Вроцлав, Республика Польша)

Калюжнова Н.Я., доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой экономической теории и управления Иркутского государственного университета (г. Иркутск, Российская Федерация)

Ковачев А.Д., доктор архитектуры, профессор, иностранный член РААСН, заведующий кафедрой архитектуры и урбанистики архитектурного факультета Варненского свободного университета им. Ч. Храбра, Варна (г. София, Республика Болгария)

Кузьмин М.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик РАН, лауреат Демидовской премии, Институт геохимии СО РАН, советник РАН (г. Иркутск, Российская Федерация)

Леонард Шенк, доктор архитектуры, профессор факультета архитектуры и дизайна Констанцского университета (г. Констанц, Федеративная Республика Германия)

Леонович С.Н., доктор технических наук, профессор, иностранный академик РААСН, профессор кафедры технологии строительного производства Белорусского национального технического университета, заместитель председателя научного совета РААСН «Механика разрушения материалов и конструкций» (г. Минск, Республика Беларусь)

Ляхович Л.С., доктор технических наук, профессор, академик РААСН, заведующий кафедрой строительной механики Томского архитектурно-строительного университета (г. Томск, Российская Федерация)

Матвеева М.В., доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры экспертизы и управления недвижимостью Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Российская Федерация)

Нгуен Туан Ань, доктор технических наук, научный сотрудник кафедры водоснабжения и водоотведения Университета природных ресурсов г. Хошимин (г. Хошимин, Республика Вьетнам)

Нечаев А.С., доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой экономики и цифровых бизнес-технологий Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Российская Федерация)

Новицкий Н.Н., доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Российская Федерация)

Сетогутти Тсуеши, доктор технических наук, профессор департамента архитектуры Университета Хоккайдо (Япония)

Сколубович Ю.Л., доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, ректор Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (г. Новосибирск, Российская Федерация)

Стенников В.А., доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, председатель научно-экспертного совета по энергоэффективности (г. Иркутск, Российская Федерация)

Урханова Л.А., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных материалов и изделий Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления (г. Улан-Удэ, Российская Федерация)

Фолькер Циглер, доктор архитектуры, профессор, заведующий кафедрой городского планирования и проектирования Страсбургской архитектурной школы (г. Страсбург, Французская Республика)

Холодова Л.П., доктор архитектуры, профессор, советник РААСН, член-корреспондент Академии художеств, заведующий кафедрой теории архитектуры и профессиональных коммуникаций Уральского государственного архитектурно-художественного университета (г. Екатеринбург, Российская Федерация)

Хомкалов Г.В., доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры экономики и управления инвестициями и недвижимостью Байкальского государственного университета (г. Иркутск, Российская Федерация)

Энгель Барбара, доктор архитектуры, специалист по городскому планированию Дрезденского технического университета (г. Дрезден, Федеративная Республика Германия)

Яськова Н.Ю., доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой инвестиционно-строительного бизнеса, Институт отраслевого менеджмента, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (г. Москва, Российская Федерация)

EDITORIAL BOARD

Peshkov V.V., Editor-in-Chief, Doctor of Economical Sciences, Professor, Head of the Department of Real Estate Expertise and Management of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russian Federation)

Chupin V.R., Deputy Editor-in-Chief, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Urban Development and Municipal Economy of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russian Federation)

Afanasiev A.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding member of RAACS, Professor of National Research Moscow State Construction University (Moscow, Russian Federation)

Batmunkh Sereeter, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Academy of Sciences of Mongolia, Director of the Institute of Thermal Engineering and Industrial Ecology of Mongolian Academy of Sciences, Head of Department of Thermal Power Plants of the Mongolian State University of Science and Technology (Ulan Bator, Mongolia)

Bekker A.T., Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding member of RAACS, Professor of Engineering School of Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation)

Walter Fogt, Doctor of Technical Sciences, Specialist in transportation planning, Stuttgart University (Germany)

Vasiliev Yu.E., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Road Construction and Maintenance of Moscow State Automobile and Road Technical University (Moscow, Russian Federation)

Grebenyuk G.I., Doctor of Technical Sciences, professor, Advisor of RAACS, Head of the Department of Construction Mechanics of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Novosibirsk, Russian Federation)

Dimitra Nikolau, Doctor of Architecture, Professor, Department of Urban and Regional Planning of School of Architecture of Athenes National Technical University (Athenes, Greece)

Erofeev V.T., Doctor of Technical Sciences, professor, Academician of RAACS, Head of the Department of Building Materials and Technologies of National Research Mordovian State University named after N.P. Ogareva (Saransk, Republic of Mordovia, Russian Federation)

Yefimov A.V., Doctor of Architecture, Professor, Head of Department of architectural environment design of Moscow Architectural Institute, State Prize Winner of RF, Honored Art Worker (Moscow, Russian Federation)

Zbigniew Wojcicki, Doctor of Technical Sciences, Professor, Civil Engineering Department, Wroclaw University of Technology (Wrocław, Poland)

Kalyuzhnova N.Ya., Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of Department of Economics and Management of Irkutsk State University (Irkutsk, Russian Federation)

Kovachev A.D., Doctor of Architecture, Professor, Foreign Member of RAACS, Head of Department of Architecture and Urbanistics, Architecture Faculty of Varna Free University of named after Ch. Hrabar, Varny (Sophia, Bulgaria)

Kuzmin M.I., Doctor of Geological and Mineral Sciences, Professor, Academician of Russian Academy of Sciences, Winner of Demidov Award, Institute of Geochemistry of SB RAS, Advisor of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russian Federation)

Leonard Shenk, Doctor of Architecture, Professor of the Faculty of Architecture and Design of the KonstantsUniversity (Konstants, Germany)

Leonovitch S.N., Doctor of Technical Sciences, Professor, Foreign Academician of RAACS, Professor of the Department of Building technologies of Byelorussian National Technical University, Deputy Chairman of the Scientific Council of RAACS "Mechanics of materials and structures destruction" (Minsk, Belarus)

Lyakhovich L.S., Doctor of Technical Sciences, professor, Academician of RAACS, Head of the Department of Building Mechanics of Tomsk Architecture and Construction University (Tomsk, Russian Federation)

Matveeva M.V., Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Real Estate Expertise and Management of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russian Federation)

Nguyen Tuan An, Doctor of Technical Sciences, Scientific Researcher of Water Supply and Sanitation Department, University of Natural Resources (Ho Chi Minh, Vietnam)

Nechaev A.S., Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of the Department of Economics and digital business technologies of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russian Federation)

Novitskii N.N., Doctor of Technical Sciences, professor, Chief Scientific Researcher of the Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russian Federation)

Setoguchi Tsuyoshi, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture, Hokkaido University (Japan)

Skolubovitch Yu.L., Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of RAACS, Rector of Novosibirsk State University of Architecture and Construction (Novosibirsk, Russian Federation)

Stennikov V.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, corresponding member of Russian Academy of Sciences, Director of Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chairman of Scientific-Expert of the Board for Energy Efficiency (Irkutsk, Russian Federation)

Urkanova L.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Production of Building Materials and Units of East-Siberian State Technological University (Ulan Ude, Russian Federation)

Folker Tsigler, Doctor of Architecture, Professor, Head of the Department of Town-Planning and Design of Strasbourg School of Architecture (Strasbourg, France)

Kholodova L.P., Doctor of Architecture, Professor, Advisor of RAACS, Corresponding Member of the Academy of Arts, Head of the Department of Theory of Architecture and Professional Communications, Urals State Architectural-Artistic University (Yekaterinburg, Russian Federation)

Khomkalov G.V., Doctor of Economical Sciences, Professor, Professor of the Department of Economics and Management of Investment and Real Estate, Baikal State University (Irkutsk, Russian Federation)

Engel Barbara, Doctor of Architecture, specialist in urban planning of Dresden Technical University (Dresden, Germany)

Yaskova N.Yu., Doctor of Economical Sciences, Professor, Head of the Department of Investment and Construction Business, Institute of Industry Management, The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (Moscow, Russian Federation)

СОДЕРЖАНИЕ

Известия вузов
Инвестиции. Строительство. Недвижимость

Том 13 № 2 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Торохова К.Е., Матвеева М.В.** Оценка экономической эффективности и перспектив внедрения технологий информационного моделирования на этапе проектирования в строительной отрасли региона 192

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. СТРОИТЕЛЬСТВО

- Балабанов В.Б., Молоков В.С.** Оценка влияния различных стабилизирующих добавок, в том числе гидролизного лигнина, на основные физические и эксплуатационные показатели щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей 202
- Бобер А.А., Чупин Р.В., Скибо Д.В., Дударев В.И.** Повышение надежности работы систем водоотведения за счет аккумулирующей способности самотечных коллекторов 213
- Васильев А.В., Савватеев В.А., Фомин Н.И., Антипин В.В.** Испытания металлических гидрошпонок для гидроизоляции технологических швов 227
- Гребнева О.А., Лавыгина О.Л., Алексеев А.В.** Исследование эффективности аддитивного инфракрасного отопления промышленных зданий на территориях с пониженными температурами воздуха 239
- Дмитриева Т.Л., Яценко В.П., Курышов И.А.** BIM как средство сквозного проектирования, технологии возведения и эксплуатации 252
- Емельянова Н.А.** Исследование морозостойкости литых поропластов многослойных стеновых ограждений 262
- Козлов Р.Н., Пешков А.В.** Интеграция бережливого производства и BIM-технологий как основа эффективного проектного управления и организации производственных процессов на этапе строительства 271
- Мартьянов В.И.** Проект программного комплекса генерации машин Тьюринга, решающих NP-трудные задачи 285
- Паршин В.М., Шалагин Д.С., Баранова А.А.** Влияние насыщения древесины огнебиозащитными составами на горючесть 298
- Пешков В.В.** Прогнозирование и оценка эффективности и надежности строительных систем при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций 307
- Пинус Б.И.** Проектное прогнозирование эксплуатационной надежности сооружений в суровых климатических условиях 316
- Севастьянов П.Д., Казаков А.В., Матвеева М.В., Пешков А.В.** Развитие систем автоматизированного управления на этапе строительства (на примере линейных объектов) 324
- Смирнова Е.Э.** Анализ и управление рисками в российских и международных стандартах безопасности 336
- Соболев В.И., Кармазинов Д.А., Черниговская Т.Н.** Метод гармонического элемента в расчетном обеспечении безопасности эксплуатации сооружений 348
- Чупин В.Р.** Современное состояние, перспективы и пути развития систем водоснабжения и водоотведения, методы их расчета, построения и организации эксплуатации 359
- Шелехов И.Ю., Федотова М.И., Шелехова А.И.** Оптимизация параметров микроклимата в спортивных каркасно-тентовых зданиях 369

АРХИТЕКТУРА. ДИЗАЙН

- Глебушкина Л.В., Перетолчина Л.В.** Влияние структуры территориальной системы расселения интерзонального типа на развитие Ангаро-Енисейского макрорегиона 378

CONTENTS

Proceedings of Universities Investment. Construction. Real estate

Том 13 № 2 2023

CONTENTS

ECONOMICS AND MANAGEMENT

- Torokhova K.E., Matveeva M.V.** Economic efficiency and prospects for introducing information modelling technologies during the design stage in the building sector of a region 192

TECHNICAL SCIENCES. CONSTRUCTION

- Balabanov V.B., Molokov V.S.** Evaluation of the impact of various stabilizing additives, including hydrolysis lignin, on the basic physical and operational parameters of rubble-mastic asphalt concrete mixtures 202
- Bober V.A., Chupin R.V., Skibo D.V., Dudarev V.I.** Improving reliability of a sewer system through accumulating capacity of gravity-flow sewers 213
- Vasilev A.V., Savvateev V.A., Fomin N.I., Antipin V.V.** Testing of metal waterstops for waterproofing tack welds 227
- Grebneva O.A., Lavygina O.L., Alekseev A.V.** Study into the efficiency of additive infrared heating of industrial buildings in areas with low outside temperatures 239
- Dmitrieva T.L., Yashchenko V.P., Kuryshov I.A.** BIM as a means of end-to-end design, construction, and operation 252
- Emelyanova N.A.** Research into the frost resistance of cast foam plastics in multilayer wall envelopes 262
- Kozlov R.N., Peshkov A.V.** Integration of lean management and BIM technologies for effective project management and production processes at a construction stage 271
- Martyanov V.I.** Draft program complex for generating Turing machines solving NP-hard problems 285
- Parshin V.M., Shalagin D.S., Baranova A.A.** Influence of wood saturation with fire- and bioprotective agents on its combustibility 298
- Peshkov V.V.** Forecasting and assessment of efficiency and reliability of construction systems during emergency response 307
- Pinus B.I.** Design forecasting of serviceability of structures in harsh climatic conditions 316
- Sevastyanov P.D., Kazakov A.V., Matveeva M.V., Peshkov A.V.** Development of automated control systems at the construction stage (using the example of linear objects) 324
- Smirnova E.E.** Risk analysis and management according to Russian and international safety standards 336
- Sobolev V.I., Karmazinov D.A., Chernigovskaya T.N.** Harmonic element method for calculation of operating safety of structures 348
- Chupin V.R.** Current state and prospects of water supply and sanitation systems, methods for their calculation, design, and operation 359
- Shelekhov I.Yu., Fedotova M.I., Shelekhova A.I.** Optimization of microclimate parameters in sports frame and tent facilities 369

ARCHITECTURE. DESIGN

- Glebushkina L.V., Peretolchina L.V.** Influence of the structure of an interzonal-type territorial settlement system on the development of the Angara-Yenisei macroregion 378



Оценка экономической эффективности и перспектив внедрения технологий информационного моделирования на этапе проектирования в строительной отрасли региона

К.Е. Торохова^{1✉}, М.В. Матвеева²

^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. На протяжении последнего десятилетия технологии информационного моделирования активно внедряются в мировую строительную отрасль. Целью исследования является обоснование экономической эффективности при внедрении технологий информационного моделирования в процессы реализации строительного проекта. Данное исследование выполнено преимущественно методами анализа и синтеза. В статье рассматриваются материалы, отражающие показатели экономической эффективности технологий информационного моделирования. Ключевым моментом является организация совместной работы всех участников проекта с учетом специфических особенностей регионов. Установлено, что этап проектирования – наименее затратный с точки зрения финансов, следовательно, эффективность применения технологий информационного моделирования хорошо видна именно там. В статье рассмотрены достоинства и недостатки применения технологий информационного моделирования. Выполнено сравнение показателей возврата капитальных вложений в зависимости от степени внедрения технологий информационного моделирования в организации. Сделан акцент, что показатель окупаемости инвестиций – не единственный показатель, используемый для оценки экономической эффективности, так как он не учитывает множество факторов. Для комплексной оценки экономического эффекта проанализированы показатели, используемые при оценке инвестиционных проектов: чистый дисконтированный доход, индекс рентабельности, внутренняя норма доходности и срок окупаемости. Рассмотрен пример внедрения технологий информационного моделирования в небольшую проектную организацию, рассчитан коэффициент возврата инвестиций. В результате исследования сделан вывод о важности повсеместного внедрения технологий информационного моделирования как основы для повышения производственной и экономической эффективности организаций.

Ключевые слова: технологии информационного моделирования, BIM-технологии, строительный проект, информационная модель, экономическая эффективность, показатель окупаемости инвестиций ROI

Для цитирования: Торохова К.Е., Матвеева М.В. Оценка экономической эффективности и перспектив внедрения технологий информационного моделирования на этапе проектирования в строительной отрасли региона // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 192–201. <https://elibrary.ru/lmgvfy>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-192-201>.

Original article

Economic efficiency and prospects for introducing information modelling technologies during the design stage in the building sector of a region

Ksenia E. Torokhova^{1✉}, Maria V. Matveeva²

^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Over the past decade, information modelling technologies have been actively introduced in the global construction industry. This study aims to substantiate the economic efficiency of implementing these technologies in construction processes. The primary methods employed in this study involve analysis and synthesis. The article examines data that reflects the indicators of economic efficiency

© Торохова К.Е., Матвеева М.В., 2023

associated with information modelling technologies. The cooperation of all project participants, while considering specific regional characteristics, is of utmost importance. Since the design stage is the least financially expensive phase, the efficiency of information modelling technologies can be well observed. The article discusses both the advantages and disadvantages of using information modelling technologies. A comparison of return on investment (ROI) indicators was carried out, considering the degree of adoption of information modelling technologies within enterprises. It is important to note that ROI comprises only one of the indicators used to assess economic efficiency, since it fails to consider other factors. In order to comprehensively evaluate the economic effect, various indicators used in investment project assessment were analysed, including net present value, profitability index, internal rate of return, and payback time. The article presents an example of implementing information modelling technologies in a small project entity, where the ROI coefficient is calculated. From the analysis, it is concluded that information modelling technologies should be widely implemented as a foundation for improving the production and economic efficiency of companies.

Keywords: information modeling technologies, BIM technologies, construction project, information model, economic efficiency, return on investment ROI

For citation: Torokhova K.E., Matveeva M.V. Economic efficiency and prospects for introducing information modelling technologies during the design stage in the building sector of a region. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(2):192-201. (In Russ.). <https://elibrary.ru/lmgvfy>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-192-201>.

ВВЕДЕНИЕ

Активное и повсеместное внедрение технологий информационного моделирования (далее – ТИМ) на территории Российской Федерации началось с принятия законодательных актов, закрепивших такое понятие как информационное моделирование, а также регламентирующих формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства.

Под технологиями информационного моделирования понимают создание информационной модели будущего объекта строительства, включая архитектурные, конструктивные, электротехнические, технологические, экономические и иные решения, которые имеют отношение к проектируемому объекту. В такой информационной модели изменение одного параметра автоматически приводит к изменению всех остальных зависимых от него величин.

В целом, ТИМ – это отечественный аналог BIM-технологий, активно используемых за рубежом уже на протяжении многих лет. При этом уровень внедрения таких технологий на территории Российской Федерации значительно ниже, чем, к примеру, в строительной индустрии США или Сингапура [1]. Актуальность исследования подтверждается тем, что срок введения обязательного применения информационной модели, включая графическую модель в трёхмерном изображении, зафиксирован в постановлении № 962, в соответствии с которым вышеуказанное требование будет обязательным с 1 марта 2023 года, а до тех пор

дополнять проектную документацию трехмерной моделью необходимо только при условии, если это предусмотрено техническим заданием или договором. Таким образом, внедрения ТИМ для каждой отдельно взятой организации – вопрос времени. Следовательно, актуальность исследования еще и в том, чтобы показать и обосновать экономическую эффект для организаций, которые работают с ТИМ.

Объектом исследования являются участники строительного процесса, в первую очередь организации, ведущие проектную деятельность. Предметом исследования является возможная экономическая эффективность, получаемая при внедрении ТИМ.

Цель исследования – обосновать необходимость внедрения технологий информационного моделирования в процессы реализации строительного проекта.

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Системный подход, аналитический метод, сравнительный анализ статистических показателей, обеспечивающие адекватное решение поставленной задачи анализа экономической эффективности внедрения технологии информационного моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего стоит понимать, что технология информационного моделирования объектов строительства – это всегда процесс коллективного, совместного создания конечного продукта. Фундаментом для принятия

грамотных решений по управлению строительством на протяжении всего жизненного цикла объекта (начиная планированием и проектированием и заканчивая реконструкцией и сносом) становится абсолютно вся информация о здании или сооружении, имеющаяся в

распоряжении и полученная в ходе процесса ТИМ [2]. Согласованная и взаимосвязанная работа инвестора, застройщика (заказчика), генеральных проектировщика и подрядчика, так и эксплуатирующей организации строится вокруг трехмерной информационной модели (рис. 1).



Рис. 1. Процесс технологий информационного моделирования
Fig. 1. The process of information modeling technologies

Наглядно видно, что ключевым моментом здесь является организация совместной работы со всеми участниками инвестиционного процесса. Участники проекта имеют возможность оперативно принимать разумные управленческие решения на основе всей имеющейся информации, а ТИМ, в свою очередь, отрегулирует процессы совместной работы с информацией об объекте строительства [3].

Из вышесказанного наглядно видно, что ТИМ - далеко не простое скучное программное обеспечение, а это комплекс взаимосвязанных процессов, происходящих между всеми субъектами строительного проекта, причем изменение одного параметра проекта незамедлительно приведет к изменению остальных параметров.

Таким образом, применение технологий информационного моделирования всеми участниками строительного процесса имеет ряд неоспоримых преимуществ [4, 5]:

1. Создание проектно-сметной документации высокого качества.
2. В процессе создания и реализации проекта (модели) есть возможность оперативно подключать к работе требуемых специалистов, что существенно сокращает ошибки проектирования.
3. Использование ТИМ позволяет вычислять проектные параметры зданий и сооружений с привязкой к рельефу определенной строительной площадки.
4. Контроль формирования расходов и затрат на материалы прост и понятен.
5. Оперативный и доскональный контроль качества и сроков выполнения работ на каждой стадии проекта [6].
6. Возможность максимально эффективного внедрения модели проектируемого здания в окружающую застройку.
7. Коммуникация застройщика и подрядной организации происходит в онлайн режиме, что уменьшает время на корректировку проектных решений.

8. Более совершенная система организации, управления строительством и последующая эксплуатация объекта.

9. Полная информации о возможности последующей реконструкции, модернизации или ликвидации объекта [7].

Тем не менее, не смотря на очевидные преимущества повсеместного внедрения и использования ТИМ, распространение таких технологий в нашей стране идет довольно медленными темпами [8].

Основными факторами, которые влияют на медленное распространение ТИМ, обычно называют:

- 1) существенные финансовые вложения, необходимые на первых этапах и связанные с покупкой оборудования и программного обеспечения;
 - 2) наблюдается дефицит квалифицированных кадров, подготовленных для работы с ТИМ, на рынке труда;
 - 3) явные проблемы инфраструктуры: к ним относятся огрехи нормативной базы, а также отсутствие системы государственных стандартов реализации строительных проектов с применением ТИМ на всех стадиях: проектирования, строительства и эксплуатации [9].
- И действительно, существенное повышение стоимости и времени проектирования – неотъемлемая часть внедрения ТИМ, однако на этапах строительства, эксплуатации и возможной реконструкции трехмерных объектов расходы ощутимо снизятся, а четкость принимаемых решений наоборот повысится. Первоначальные вложения капитала с целью внедрения велики, однако необходимо детально и комплексно спрогнозировать возможный экономический эффект такой интеграции [10].

Показатель окупаемости инвестиций ROI (return on investment) – в данном случае один из важнейших показателей. ROI наглядно демонстрирует эффективность вложений компании в ТИМ. Еще у самых истоков внедрения ТИМ неоднократно предпринимались попытки

спрогнозировать и оценить экономический эффект такого внедрения [11]. В результате обработки статистических данных нескольких инвестиционно-строительных проектов [12] было установлено:

1) за счет выявления недчётов и спорных решений на этапе проектирования экономия денежных средств составила 10%;

2) на 7 % сократилось время проектирования [13].

При этом, по результатам расчета ROI в зависимости от уровня внедрения ТИМ в

процессы, было установлено, что коэффициент возврата инвестиций может достигать от 11% до 50% (рис. 2).

Как наглядно видно, чем выше уровень внедрения ТИМ в организации, к примеру, при многократном использовании модели на различных объектах, тем больше преимуществ это дает: это и увеличение прибыли, и сокращение количества изменений проекта и, как следствие, сокращение сроков выполнения работ, а также повышение производительности труда (таблица).

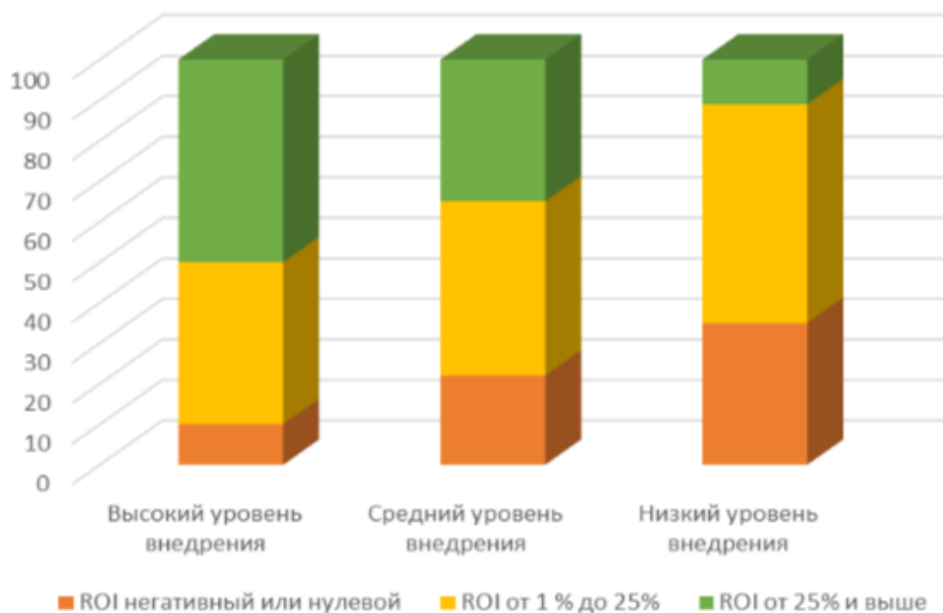


Рис. 2. Коэффициент возврата инвестиций в ТИМ при ее внедрении в организации
Fig. 2. The return on investment in BIM when it is implemented in the organization

Преимущества технологий информационного моделирования
для разного типа организаций, %

Benefits of Building Information Modelling for different types of organizations, %

Преимущества для компаний	Организации, использующие ТИМ	
	Впервые	Множественно
Увеличение прибыли	7	43
Сокращение количества ошибок и исправлений в проекте	23	77
Повышение производительности труда	46	71
Повторные сделки с бывшими клиентами	19	61
Новые предложения услуг	28	72

Стоит отметить, что именно этап проектирования является наименее затратным с точки зрения финансов (в соответствии с графиком П. Макмили) [14]. Таким образом, эффективность применения ТИМ хорошо видна именно на этом этапе, внесение изменений в проект на ранних этапах наиболее эффективно.

Тем не менее, говоря об экономическом эффекте от внедрения ТИМ, не верно

оценивать его, основываясь только на величине возврата капитальных вложений, так как величина ROI не берет в расчет существенное множество факторов, что, в свою очередь, может привести к тому, что при первоначальном расчете ROI покажет нецелесообразность внедрения [15].

При внедрении ТИМ организация всегда понесет первоначальные затраты, связанные с

покупкой необходимого программного обеспечения, закупкой или модернизацией компьютерной техники, а также повышением квалификации сотрудников [16]. При этом сумму таких затрат определить довольно просто.

Следующий вид затрат будет связан с изменением существующих отложенных процессов работы организации с помощью внедрения проектного управления. Разработка необходимых стандартов, правил, библиотек, внедрение новой корпоративной культуры и, несомненно, изменение мышления сотрудников – все это необходимо при внедрении ТИМ. Причем некорректно такие затраты привязывать к какому-то одному проекту, либо определенному промежутку времени. Период вышеуказанных затрат сложно спрогнозировать и оценить такие затраты в денежном эквиваленте [17].

Так как финансовые вложения в технологии информационного моделирования – это своего рода инвестиционный проект, следовательно, для определения экономической эффективности внедрения ТИМ целесообразно рассматривать реализацию такой системы в организации именно с точки зрения управления проектом. Применение такого подхода обусловлено наличием всех признаков проекта – это стоимость, сроки, качество [18]. Как упоминалось выше, внедрение и использование ТИМ затрагивает весь жизненный цикл объекта: начиная технико-экономическим обоснованием реализации проекта и заканчивая стадией завершения проекта и последующего сноса. Таким образом, представляется логичным и обоснованным для оценки экономической эффективности применить методику подсчета коммерческой эффективности инвестиционного проекта. Однако не стоит забывать, что ТИМ – не типичный инвестиционный проект, он имеет специфические особенности, которые необходимо учитывать при расчете экономического обоснования. В соответствии с временной стоимостью денежных средств, использование метода дисконтирования денежных потоков подразумевает приведение экономических показателей к конкретному временному периоду, что, в свою очередь, является особенно актуальным для долгосрочных проектов, таких как реализация строительного проекта [19].

Основными показателями, которые принято использовать для оценки эффективности от внедрения ТИМ в мировой практике, в соответствии с методом оценки инвестиционных проектов, являются:

- 1) чистый дисконтированный доход;
- 2) индекс рентабельности;
- 3) внутренняя норма доходности;
- 4) срок окупаемости [20].

1. Чистый дисконтированный доход (ЧДД, NPV) – один из важнейших показателей эффективности проекта. Является интегральным показателем эффективности проекта, представляет собой накопленный дисконтированный эффект за расчетный период¹. То есть данный показатель отражает разницу между всеми денежными притоками и оттоками, приведенными к текущему моменту времени (моменту оценки инвестиционного проекта). В общем виде ЧДД определяется по следующей формуле:

$$NPV = -IC + \sum Cft / (1 + r)^t$$

где NPV – величина чистого дисконтированного дохода; IC – начальные инвестиции; Cft – потоки денежных средств в конкретный период срока окупаемости проекта, которые представляют собой суммы притоков и оттоков денежных средств в каждом конкретном периоде t ($t = 1...n$); r – ставка дисконтирования

Согласно исследованиям, выполненным НИУ МГСУ в тендеме с ООО «КОНКУРАТОР», рост показателя NPV при внедрении ТИМ составил в среднем от 10% до 25%.

2. Индекс рентабельности (доходности, ИР) – это показатель отношения дисконтированных денежных потоков от инвестиций к сумме инвестиций. Довольно важный экономический показатель, позволяющий рассчитать объем полученных доходов на каждый инвестированный рубль. Рост индекса рентабельности порядка 14-15% – именно такие показатели мы можем видеть, говоря о проектах с применением ТИМ [21]. Рост качества имеющейся информации, что влечет за собой повышение качества принимаемых управленческих решений, автоматизация труда и рост его производительности, повышение эффективности большинства производственных процессов – именно эти преимущества дают многогранные возможности использования ТИМ. Как уже упоминалось выше, ТИМ — это всегда комплексное решение, приносящее, в свою очередь, комплексный эффект. Поэтому для получения таких показателей роста эффективности необходимо использовать ТИМ комплексно, а не используя только один или несколько отдельных факторов.

3. Внутренняя норма доходности (IRR) –

¹Understanding BIM in a project management environment // NBS Enterprises Ltd. URL: <https://www.thenbs.com/knowledge/understanding-bim-in-a-project-management-environment> (02.08.2022).

расчетная ставка дисконтирования, при которой инвестор получит назад все вложения, то есть выйдет в ноль. Для того чтобы рассчитать рентабельность и прибыльность любого инвестиционного проекта, вне зависимости от отрасли и инвестируемых сумм, используют именно IRR [22]. При расчете IRR для ТИМ-проектов в тех организациях, где наблюдается высокий уровень внедрения ТИМ, установлен рост показателя IRR в диапазоне от 14% до 20%². Таким образом, становится возможным сделать вывод, что активное применение ТИМ с высоким уровнем внедрения в организации позволяет такой организации выявить значительный потенциал для роста эффективности деятельности в инвестиционно-строительной сфере.

4. Срок окупаемости проекта – последний, но не менее важный показатель, чем вышеупомянутые, так как срок окупаемости и реализации инвестиционного проекта имеет огромное значение для принятия управленческих решений. При сравнении проектов, которые были реализованы с применением привычных, традиционных технологий проектирования и управления проектами с ТИМ-проектами, наблюдается сокращение сроков окупаемости в среднем на 15–17% при реализации последних [23]. Таким образом, целесообразно сделать вывод о сокращении сроков окупаемости инвестиций в объект капитального строительства, и, как следствие, о снижении общего уровня риска по ТИМ-проектам.

Естественно, основная проблема при оценке эффективности внедрения ТИМ – это верное определение вышеуказанных показателей. Необходимо правильно определить доходную и затратную составляющие, связанные с проектом по реализации технологии информационного моделирования.

Безусловно, в зависимости от сферы деятельности организации (проектирование, выполнение строительно-монтажных работ или эксплуатация), при расчете экономической эффективности необходимо учитывать только те показатели эффекта, на которые непосредственно влияет внедренная технология. Если говорить о крупных организациях, работа которых охватывает весь жизненный цикл инвестиционно-строительного проекта, расчет экономического эффекта целесообразно выполнять, учитывая все способы и методы оценки достижения результатов. Для организаций, занимающихся проектированием – только показатели, которые непосредственно влияют на сроки, качество и стоимость проектных работ [24, 25].

И, если в крупных организациях, работа которых охватывает весь жизненный цикл объекта, экономический эффект, получаемый при

внедрении ТИМ очевиден, то каков эффект, к примеру, для небольших проектных организаций? Ведь, как выше уже упоминалось, эффективность ТИМ особенно выражена на этапе проектирования.

Рассмотрим деятельность проектной организации, расположенной на территории Иркутской области, в штате которой присутствуют специалисты, обеспечивающие разработку полного комплекта проектной документации. Штатная численность проектировщиков – 10 человек. При этом компания работает в CAD (Computer Aided Design – система автоматизированного проектирования). Абсолютно для любой проектной организации переход от технологии CAD к технологиям BIM будет означать закупку и внедрение нового программного обеспечения, и повышение квалификации персонала. То есть значительные экономические затраты на первоначальном этапе. Следовательно, рассматриваемая проектная организация понесет затраты на закупку нового программного обеспечения и переобучение существующего персонала, при этом явный эффект от внедрения ТИМ будет получен только в случае, если все специалисты перейдут на новое программное обеспечение [26]. Инвестиции в программные обеспечения составляют около 200 000 руб. на 1 штатного проектировщика. Следовательно, затраты компании на покупку нового ПО составят 2 млн руб. ежегодно, так как покупка лицензии на использование ПО – это не одноразовое вложение. Расходы на переобучение персонала: на основании данных, находящихся в общем доступе в сети Интернет установлено, что стоимость обучения работы в ТИМ в Иркутской области для одного человека составляет 15 000 руб. за курс 28 академических часов (1 месяц) по одному из выбранных программных продуктов. Итого затраты на обучение персонала организации составят 150 000 руб. Следовательно, расходы на внедрение ТИМ в проектной организации составят 1 650 000 руб.

Для оценки экономической эффективности в данном случае целесообразно рассчитать величину ROI в течение первого года:

$$ROI = \frac{\left(B - \left(\frac{B}{1+E}\right)\right) \times (12-C)}{A + (B \times C \times D)},$$

где A – стоимость оборудования и ПО; B – стоимость рабочей силы в месяц; C – длительность обучения (мес.); D – снижение производительности во время обучения (%); E – рост производительности после обучения (%).

Заработная плата проектировщика на территории Иркутской области в среднем составляет 54 146 руб. Согласно исследованиям, выполненным НИУ МГСУ в тендеме с ООО «КОНКУРАТОР», рост

производительности труда при внедрении ТИМ составила в среднем от 20% до 30%. Снижение производительности на время обучения составит так же порядка 30%. Показатель ROI для небольшой проектной организации равен 1,6%, т.е. внедрение ТИМ для такого рода организаций практически не несет никакой прибыли.

ВЫВОДЫ

Вне зависимости от того, насколько выгодным или нет по выполненным расчетам окажется инвестиционный проект по внедрению ТИМ в деятельности предприятия, как проектным, так и строительным организациям необходимо понимать, что внедрение технологий информационного моделирования является не только рекомендуемым методом выпуска проектов, но и в ближайшем будущем без использования ТИМ у организаций нет будущего [27, 28].

При этом готовность участников строительной отрасли переходить на ТИМ – довольно острый и сложный вопрос. В настоящее время очень малое число крупных столичных компаний имеют положительный опыт внедрения

ТИМ на своих объектах. При этом оценка работы таких компаний говорит о том, что достижение положительных результатов заняло порядка 8 лет активной работы в этом направлении при значительных финансовых вложениях, исчисляемых сотнями миллионов рублей – это и создание технологических платформ, сервисов, баз данных и подготовка квалифицированных кадров [29]. Если же говорить о организациях строительной отрасли, осуществляющих свою деятельность в регионах, в том числе в Иркутской области, то процент компаний, имеющих положительный опыт внедрения ничтожно мал.

Таким образом, результате исследования сделан вывод о необходимости повсеместного внедрения технологий информационного моделирования для развития строительной отрасли и усовершенствования строительных процессов, при этом установлен факт экономической эффективности от такого внедрения.

Следовательно, чем быстрее предприятие начнет внедрять и реализовывать данные технологии, тем быстрее получит конкурентные преимущества над остальными

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Асланов Н.М., Садиг Р.И. Основные методы оценки эффективности инвестиционных проектов // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2011. № 3. С. 39–46. EDN: NDVDNB.
2. Баженов А.А. Проблемы применения BIM-технологий в современной строительной отрасли // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы Всероссийской научно-практической конференции (г. Санкт-Петербург, 29–30 марта 2018 г.). СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. С. 62–64. EDN: YUOMKG.
3. Страхов А.С., Исупова Д.А., Трегубов А.П. Специфика государственного регулирования внедрения ТИМ-технологий в строительстве // XXVI Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области: материалы конф. (г. Волгоград, 16–28 ноября 2021 г.). Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2022. С. 305–306. EDN: BXPATQ.
4. Шестерикова Я.В. Применение технологий информационного моделирования при реализации инвестиционно-строительных проектов // Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 3 (129). С. 95–97. EDN: PARUNQ.
5. Болотова А.С., Маршавина Я.И. Проблемы внедрения технологии информационного моделирования в России // Строительное производство. 2021. № 2. С. 70–80. EDN: PEYWAO. https://doi.org/10.54950/26585340_2021_2_70.
6. Романова М.В. Оценка эффективности инвестиционного проекта // Экономический анализ: теория и практика. 2007. № 7 (88). С. 17–26. EDN: HYSQTZ.
7. Верстина Н.Г., Кисель Т.Н., Кулаков К.Ю. Внедрение инновационных технологий на предприятиях инвестиционно-строительной сферы: проблемы и определяющие факторы // E-Management. 2022. Т. 5. № 1. С. 4–13. EDN: SPXUXG. <https://doi.org/10.26425/2658-3445-2022-5-1-4-13>.
8. Гевара Рада Л.Т., Пешков В.В., Мартынов В.И., Радионова Е.А., Бужеева Ф.Г., Сайбаталова Е.В. Технологии информационного моделирования (BIM) как основа бережливого строительства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 1 (40). С. 70–81. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-1-70-81>. EDN: TDEUOH.
9. Дмитриев А.Н., Владимирова И.Л. Технологии информационного моделирования в управлении строительными проектами России // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 10. С. 48–59. EDN: FXXZAA. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.10.48-59>.
10. Ильинова В.В., Мицевич В.Д. Международный опыт использования BIM-технологий в строительстве // Российский внешнеэкономический вестник. 2021. № 6. С. 79–93. <https://doi.org/10.24412/2072-8042-2021-6-79-93>. EDN: XWHWUJ.
11. Колчин В.Н. Применение BIM-технологий в строительстве и проектировании // Инновации и инвестиции. 2019. № 2. С. 209–214. EDN: NJLLFO.
12. Кравченко Т.В. BIM-технологии в управлении строительными проектами // Молодой ученый. 2019. № 3 (241). С. 176–179. EDN: YUQYVN.
13. Крюков К.М., Кулешов А.А. Методология экономического обоснования применения технологии

информационного моделирования // Инженерный вестник Дона. 2020. № 9 (69). С. 122–132. EDN: UGDMUR.

14. Пешков В.В., Алексанин И.А. Разработка организационно-технических решений на этапе капитального ремонта жизненного цикла объекта строительства с использованием возможностей его цифровой модели // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022;12(2):196-205. EDN: IFZYVX.

<https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-2-196-205>.

15. Рыбаков Д.А., Астафьева Н.С. Анализ эффективности строительно-инвестиционных проектов с учетом применения BIM-технологий // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 33. С. 1565–1570. EDN: STQVLP.

16. Сидорова Е.А. Совершенствование организационных методов управления реконструкцией с использованием технологии информационного моделирования // E-SCIO. 2019. № 4 (31). С. 43–47. EDN: JNBNYM.

17. Уткина В.Н., Грязнов С.Ю., Бабушкина Д.Р. Проблемы и перспективы внедрения технологии информационного моделирования в области строительства в России: проблемы и перспективы внедрения // Основы экономики, управления и права. 2019. № 1 (19). С. 57–61. EDN: YPHGPG.

https://doi.org/10.51608/23058641_2019_1_57.

18. Dmitriev A.N., Vladimirova I.L., Kallaur G.Yu., Tsygankova A.A. Approaches to classifying building innovations while implementing information modeling and project management // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2019. No. 12 (2). P. 143–151. <https://doi.org/10.25103/jestr.122.20>. EDN: OSVLUR.

19. Eastman Ch., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. New York: John Wiley and Sons, 2011. 640 p.

20. Marzouk M., Elmaraghy A., Voordijk H. Lean Deconstruction Approach for Buildings Demolition Processes using BIM // Lean Construction Journal. 2019. P. 147–173.

21. Tokarsky A., Topchiy D. The concept of quality control of the organization of construction processes during construction supervision through the use of information technology // Sustainable Development of Industrial Region: Ural Environmental Science Forum (UESF-2021). E3S Web of Conferences (Chelyabinsk, 17–19 February 2021). 2021. Iss. 258 (59). P. 09028. EDN: KHTYBD.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125809028>.

22. Rinke N., von Gösseln I., Kochkine V., Schweitzer J., Berkahn V., Berner F. Simulating quality assurance and efficiency analysis between construction management and engineering geodesy // Automation in Construction. 2017. Vol. 76. P. 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.01.009>.

23. Battikha M.G. Quality management practice in highway construction // International Journal of Quality and Reliability Management. 2003. No. 20. P. 532–550.

<https://doi.org/10.1108/02656710310476516>.

24. Гинзбург А.В., Шилова Л.А., Шилов Л.А. Современные стандарты информационного моделирования в строительстве // Научное обозрение. 2017. № 9. С. 16–20. EDN: ZGIVIV.

25. Topchiy D., Bolotova A. Systematization of Factors Affecting the Organizational Processes in the Conversion of Buildings // Mip Engineering 2019: Advanced Technologies In Material Science, Mechanical and Automation Engineering IOP Conference Series: materials Science and Engineering/ International Scientific Workshop. Krasnoyarsk: Institute of Physics Publ., 2020. T. 537. P. 32–42. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/3/032042>.

EDN: CZKEIJ.

26. Пельменева Е.И., Литвинова О.В. Основные аспекты нормативного регулирования технологии информационного моделирования в России // Молодежный вестник ИрГТУ. 2021. Т. 11. № 2. С. 131–137. EDN: MNJRQV.

27. Sinenko S., Poznakhirko T., Tomov A. Digital transformation of the organization of construction production // Ural Environmental Science Forum "Sustainable Development of Industrial Region: E3S Web of Conferences (UESF-2021). (Chelyabinsk, 17–19 February 2021). 2021. Vol. 258. EDP Sciences, 2021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125809020>.

EDN: MXSZMW.

28. Sinenko S.A. Selection of Organizational and Technological Solutions for Construction. In: Earth Science: International science and technology conference. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 459. P. 052043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/5/052043>.

29. Sinenko S.A., Poznakhirko T.Y. On the Description of a Universal Model of Project System. In: Earth Science International science and technology conference // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 459. P. 052051. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/5/052051>.

REFERENCES

1. Aslanov N.M., Sadig R.I. Basic methods of evaluating efficiency of investment projects. *Problemy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom = Problems of economics and management of oil and gas complex*. 2011;3:39-46. (In Russ.). EDN: NDVDNB.

2. Bazhenov A.A. Problems of application of BIM-technologies in the modern construction industry. In: *BIM-modelirovanie v zadachakh stroitel'stva i*

arkhitektury: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = BIM modeling in the tasks of construction and architecture: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. 29-30 March 2018, Saint Petersburg. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2018. p. 62-64. (In Russ.). EDN: YUOMKG.

3. Strakhov A.S., Isupova D.A., Tregubov A.P. Specifics of state regulation of the introduction of TIM-

- technologies in construction. In: *Materialy XXVI Regional'naya konferentsiya molodykh uchenykh i issledovatelei Volgogradskoi oblasti: konferentsii = Materials XXVI Regional Conference of Young Scientists and Researchers of the Volgograd Region*. 16-28 November 2021, Volgograd. Volgograd: Volgograd State Technical University; 2022. p. 305-306. (In Russ.). EDN: BXPATQ.
4. Shesterikova Ya.V. Information modeling technologies in the implementation of investment and construction projects. *Nauka i biznes: puti razvitiya = Science and business: development ways*. 2022;3:95-97. (In Russ.). EDN: PARUNQ.
5. Bolotova A.S., Marshavina Ya.I. Problems of the implementation of bim technologies in Russia. *Stroitel'noe proizvodstvo = Construction production*. 2021;2:70-80. (In Russ.). EDN: PEYWAQ. https://doi.org/10.54950/26585340_2021_2_70.
6. Romanova M.V. Evaluation of the effectiveness of the investment project. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika = Economic analysis: theory and practice*. 2007;7:17-26. (In Russ.). EDN: HYSQTZ.
7. Verstina N.G., Kisel T.N., Kulakov K. Yu. Innovative technologies implementation to the investment and construction industry: problems and determining factors. *E-Management*. 2022;5(1):4-13. <https://doi.org/10.26425/2658-3445-2022-5-1-4-13>. (In Russ.). EDN: SPXUXG.
8. Guevara Rada L.T., Peshkov V.V., Mart'yanov V.I., Radionova E.A., Buzheeva F.G., Saibatalova E.V. Building information modelling (BIM) technology as a basis for lean construction. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2022;12(1):70-81. EDN: TDEUOH. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-1-70-81>.
9. Dmitriev A.N., Vladimirova I.L. Information modeling technologies in the management of construction projects in Russia. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and civil engineering*. 2019;10:48-59. (In Russ.). EDN: FXXZAA. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.10.48-59>.
10. Ilinova V.V., Mitsevich V.D. International experience of using bim technologies in construction. *Rossiiskii vneshneekonomicheskii vestnik = Russian foreign economic journal*. 2021;6:79-93. (In Russ.). EDN: XWHWUJ. <https://doi.org/10.24412/2072-8042-2021-6-79-93>.
11. Kolchin V.N. Application of BIM-technologies in construction and design. *Innovatsii i investitsii = Innovations and investments*. 2019;2:209-214. (In Russ.). EDN: NJLLFO.
12. Kravchenko T.V. BIM-technologies in the management of construction projects. *Molodoi uchenyi = Young scientist*. 2019;3:176-179. (In Russ.).
13. Kryukov K.M., Kuleshov A.A. Simulation of the design activity diversification of innovative enterprise. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*. 2020;9:122-132. (In Russ.). EDN: UGDMUR.
14. Peshkov V.V., Aleksanin I.A. Management and engineering solutions at the overhaul stage in the life cycle of constructing facilities using their digital models. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2022;12(2):196-205. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-2-196-205>. EDN: IFZYVX.
15. Rybakov D.A., Astafyeva N.S. Analysis of the effectiveness of construction and investment projects taking into account the use of BIM technologies. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*. 2021;33:1565-1570. EDN: STQVLP.
16. Sidorova E.A. Improvement of organizational methods for managing reconstruction using information modeling technology. *E-SCIO*. 2019;4(31). C. 43-47. EDN: JNBNYM.
17. Utkina V.N., Gryaznov S.U., Babushkina D.R. Problems and prospects of implementation of information modeling technology in the construction field of Russia: problems and prospects of implementation. *Osnovy ekonomiki, upravleniya i prava = Economy, governance and law basis*. 2019;1(19):57-61. https://doi.org/10.51608/23058641_2019_1_57. EDN: YPHGPG.
18. Dmitriev A.N., Vladimirova I.L., Kallaur G.Yu., Tsygankova A.A. Approaches to classifying building innovations while implementing information modeling and project management. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2019;12(2):143-151. EDN: OSVLUR. <https://doi.org/10.25103/jestr.122.20>.
19. Eastman Ch., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. New York : JohnWiley and Sons; 2011. 640 p.
20. Marzouk, M., Elmaraghy, A., and Voordijk, H. Lean Deconstruction Approach for Buildings Demolition Processes using BIM. *Lean Construction Journal*. 2019:147-173.
21. Tokarsky A., Topchiy D. The concept of quality control of the organization of construction processes during construction supervision through the use of information technology. In: *Sustainable Development of Industrial Region: Ural Environmental Science Forum (UESF-2021). E3S Web of Conferences*. Chelyabinsk, 17-19 February 2021. 2021. Iss. 258 (59). p. 09028. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125809028>. EDN: KHTYBD
22. Rinke N., von Gösseln I., Kochkine V., Schweitzer J., Berkhahn V., Berner F. Simulating quality assurance and efficiency analysis between construction management and engineering geodesy. *Automation in Construction*. 2017;76:24-35. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.01.009>.
23. Battikha M.G. Quality management practice in highway construction. *International Journal of Quality and Reliability Management*. 2003;20:532-550. <https://doi.org/10.1108/02656710310476516>.
24. Ginzburg A.V., Shilova L.A., Shilov L.A. Modern standards of informational modeling in construction. *Nauchnoe obozrenie*. 2017;9:16-20. (In Russ.). EDN: ZGIVIV.
25. Topchiy D., Bolotova A. Systematization of Factors Affecting the Organizational Processes in the Conversion of Buildings. In: *Mip Engineering-2019: Advanced Technologies. International Scientific*

Workshop. Krasnoyarsk: Institute of Physics Publ. 2020. Vol. 537. p. 32-42. EDN: CZKEIJ.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/3/032042>.
26. Pelmeneva E.I., Litvinova O.V. Key aspects of the regulatory control of information modeling technology in Russia. *Molodezhnyi vestnik IRGTU = ISTU bulletin of youth*. 2021;11(2):131-137. EDN MNJRQV.
27. Sinenko S., Poznakhirko T., Tomov A. Digital transformation of the organization of construction production. In: *Ural Environmental Science Forum "Sustainable Development of Industrial Region: E3S Web of Conferences (UESF-2021)*. 17-19 February 2021, Chelyabinsk. 2021. Vol. 258. EDP Sciences; 2021. EDN: MXSZMW.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125809020>.
28. Sinenko S.A. Selection of Organizational and Technological Solutions for Construction. In: *Earth Science: International science and technology conference*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 459. P. 052043.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/5/052043>.
29. Sinenko S.A., Poznakhirko T.Y. On the Description of a Universal Model of Project System. In: *Earth Science International science and technology conference // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 459. P. 052051.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/5/052051>.

Информация об авторах

Торохова Ксения Евгеньевна,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83,
e-mail: k.torokhova@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0070-3825>

Матвеева Мария Витальевна,
д.э.н., профессор,
профессор кафедры экспертизы и управления
недвижимостью,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83,
e-mail: expertiza@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-9390-5444>

Information about the authors

Ksenia E. Torokhova,
Postgraduate,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontova St., 664074 Irkutsk, Russia,
e-mail: k.torokhova@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0070-3825>

Maria V. Matveeva,
Dr. Sci. (Econ.), Professor,
Professor of the Department
of Real Estate Expertise and Management,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontova St., 664074 Irkutsk, Russia,
e-mail: expertiza@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-9390-5444>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 12.01.23
Одобрена после рецензирования 30.01.23
Принята к публикации 01.02.23

Information about the article

The article was submitted 12.01.23.
Approved after reviewing 30.01.23.
Accepted for publication 01.02.23.

**Оценка влияния различных стабилизирующих добавок, в том числе гидролизного лигнина, на основные физические и эксплуатационные показатели щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей****В.Б. Балабанов¹, В.С. Молоков²**^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. В статье рассматривается применение различных стабилизирующих добавок, в том числе гидролизного лигнина, для щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей. При проведении лабораторных испытаний использовались прошедшие поверку средства измерений и аттестованное лабораторное оборудование, а также применены официально признанные методы исследования физико-механических характеристик асфальтобетонных смесей. В результате исследований получены данные и проведен сравнительный анализ влияния стабилизирующих добавок на основные физические и эксплуатационные показатели щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей. Путем сравнительного анализа установлено, что использование различных стабилизирующих добавок в щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесях не приводит к значительным изменениям основных физических и эксплуатационных показателей, за исключением показателя стекания вяжущего, т.е. способности щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей удерживать битум. В результате лабораторных исследований также подтверждена возможность использовать стабилизирующую добавку – гидролизный лигнин – без ухудшения физических и эксплуатационных свойств смеси по ГОСТ Р 58406.1-2020. Отмечено незначительное повышение водостойкости в случае применения гидролизного лигнина, связанное с его способностью модифицировать дорожный битум и высоким содержанием в смеси относительно других добавок.

Ключевые слова: щебеночно-мастичный асфальтобетон, щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь, автомобильные дороги, стабилизирующая добавка, гидролизный лигнин, отходы деревообработки

Для цитирования: Балабанов В.Б., Молоков В.С. Оценка влияния различных стабилизирующих добавок, в том числе гидролизного лигнина, на основные физические и эксплуатационные показатели щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 202–212. <https://elibrary.ru/nrzbhy>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-202-212>.

Original article**Evaluation of the impact of various stabilizing additives, including hydrolysis lignin, on the basic physical and operational parameters of rubble-mastic asphalt concrete mixtures****Vadim B. Balabanov¹, Vladimir S. Molokov²**^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The paper considers the use of various stabilizing additives, including hydrolysis lignin, in rubble-mastic asphalt mixtures. Laboratory tests were conducted using calibrated measuring instruments and certified laboratory equipment, along with officially recognized methods for testing the physical and mechanical properties of asphalt mixtures. Based on the data obtained, a comparative analysis of the effect of stabilizing additives on the main physical and operational indicators of rubble-mastic asphalt concrete mixtures was carried out. It was established that the use of different stabilizing

additives in rubble-mastic asphalt concrete mixtures did not lead to significant changes in the basic physical and operational indicators, except for the binder flowing indicator, i.e., the ability of rubble-mastic asphalt concrete mixtures to retain bitumen. The laboratory studies also confirmed the possibility of using a stabilizing additive – hydrolysis lignin – without compromising the physical and operational characteristics of the mixture according to GOST R 58406.1-2020. A slight increase in water resistance was observed when hydrolysis lignin was added, largely due to its ability to modify road bitumen and its high content in the mixture compared to other additives.

Keyword: crushed stone-mastic asphalt concrete, crushed stone-mastic asphalt concrete mixture, highways, stabilizing additive, hydrolysis lignin, woodworking waste

For citation: Balabanov V.B., Molokov V.S. Evaluation of the impact of various stabilizing additives, including hydrolysis lignin, on the basic physical and operational parameters of rubble-mastic asphalt concrete mixtures. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(2):202-212. (In Russ.). <https://elibrary.ru/nrzbhy>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-202-212>.

ВВЕДЕНИЕ

В России на протяжении последних десяти лет все более широкое применение находит щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА). Основными его преимуществами по сравнению с другими видами асфальтобетонов являются высокая стойкость к колееобразованию и накоплению пластических деформаций, низкая истираемость шинами, повышенная трещиностойкость, а также хорошее сцепление поверхности с колесами автомобилей.

Ускоренный рост объемов применения данного материала в рамках нацпроекта «Безопасные и качественные дороги» отмечается не только на федеральных и региональных, но и на муниципальных дорогах. Так, например, в г. Иркутске покрытия из ЩМА начали устраивать с 2018 года, и за это время такие крупные улицы как Карла Маркса, Сурнова, Полярная, Тракторная были отремонтированы с применением ЩМА.

Присущей ЩМАС отличительной особенностью является повышенное содержание щебня кубовидной формы, высокое процентное содержание битума и минерального порошка. Кроме того, ЩМА имеет в составе стабилизирующую добавку, которая служит для усиления устойчивости ЩМАС к расслаиванию при транспортировке и укладке. В связи с изданием приказа Росстандарта №191-СТ от 15.05.2020 г.¹ о прекращении действия ГОСТ 31015-2002² в части дорог автомобильных общего пользования и переходом отрасли на новые стандарты, в частности

ГОСТ Р 58406.1-2020³, сведения о стабилизирующих добавках не классифицированы, влияние добавок на свойства ЩМАС не изучено. Не накоплены сведения о влиянии стабилизирующих добавок на объемную плотность, на максимальную плотность, на содержание воздушных пустот, на пустоты минерального заполнителя (ПМЗ), на водостойкость, а также на значение средней глубины колеи, требования к которым изложены в ГОСТ Р 58406.1-2020.

Учитывая большую номенклатуру видов стабилизирующих добавок, сравнительная тема их характеристик и особенностей является чрезвычайно актуальной. Стабилизирующие добавки могут отличаться не только по своему составу, но и по форме выпуска, и также по форме спрессованных гранул. В данной статье рассматриваются одни из самых часто применяемых в России добавок, со своими особенностями и свойствами, и выполнен анализ их влияния на свойства ЩМАС. Также, в качестве сравнения рассмотрена альтернативная стабилизирующая добавка из отхода промышленной обработки древесины - гидролизного лигнина. В Российской Федерации накоплены отходы гидролизного лигнина в отвалах, измеряющиеся миллионами тонн. В отвалах возможно их самовозгорание, которое ведет к выделению азотистых и сернистых соединений, а также многих других выделений, являющихся токсичными [1]. Эти токсичные выделения загрязняют почву, подземные воды и поверхностные воды [2]. Дан-

¹Об утверждении национального стандарта Российской Федерации: приказ от 15 мая 2020 г. № 191-ст // Кодекс.ру [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565018093> (15.02.2022).

²ГОСТ 31015-2002. Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон щебеночно-мастичные. Технические условия. М.: ГУП ЦПП, 2003. 21 с.

³ГОСТ Р 58406.1-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси щебеночно-мастичные асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2020. 19 с.

ный отход, обладает способностью модифицировать дорожный битум [3–7], поскольку сам считается природным полимером, а также может являться альтернативой традиционно применяемых дорогостоящих стабилизирующих добавок, что позволит утилизировать гидролизный лигнин и снизить стоимость щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей. Кроме того, известны исследования применения лигнина в качестве минерального порошка [8] и патент на изобретение, предлагающий использовать гидролизный лигнин в качестве заменителя минерального порошка [9].

Цель настоящего исследования – установление у стабилизирующих добавок к ЩМА преимуществ или недостатков относительно друг друга, обоснование необходимости применения той или иной добавки, а также влияние стабилизирующих добавок на физические показатели и эксплуатационные показатели ЩМА. Также, в статье исследована возможность гидролизный лигнин использовать как стабилизирующую добавку для ЩМАС. Для достижения цели поставлена задача изучить воздействие стабилизирующих добавок на физико-химические свойства битума и асфальтового вяжущего, физические показатели ЩМАС, эксплуатационные показатели ЩМАС. Кроме того, целесообразно рассмотреть технологические свойства стабилизирующих добавок при производстве ЩМАС⁴.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Состав ЩМАС представлен зернами щебня, минеральным порошком, песком из отсевов дробления, стабилизирующими добавками, иными добавками, битумным вяжущим. Доля щебня в ЩМАС находится в диапазоне 70–80%. Смесь составляется исходя из необходимых пропорций составляющих. Составляющие смешиваются в нагретом до требуемой температуры состоянии. При этом должна обеспечиваться способность составляющих удерживаться на поверхности щебня без стекания с поверхности при технологических температурах.

В России данный материал четко регламентируется Национальным стандартом РФ ГОСТ Р 58406.1-2020³, устанавливающий требования к смеси, а также к применяемым для ее производства исходным материалам.

ЩМА, структура которого является жесткой, передает в нижние слои нагрузки посред-

ством частиц крупного щебня, находящихся в непосредственном соприкосновении между собой. В результате деформации в поперечном и продольном направлениях слоя ЩМА являются значительно меньшими. В связи с этим ЩМА меньше склонен к образованию колеи [10].

Кроме того, покрытия из ЩМА позволяют значительно снизить уровень шума при движении по ним автомобилей, в сравнении с традиционными типами асфальта. Также, мастичный асфальт имеет повышенную шероховатость своей поверхности, что означает меньшее количество водяной пленки и луж на поверхности, меньшее количество бликов световых приборов автомобилей и лучшую видимость разметки дороги. Асфальтобетонные покрытия из ЩМАС имеют длительный срок службы и стабильные долговременные свойства. Из опыта следует, что асфальтобетон быстрее стареет, когда толщина битумной пленки составляет менее 9 микрон. Кроме того, асфальтобетон, который имеет остаточную пористость 8% и выше, также подвержен ускоренному старению. Щебеночно-мастичный асфальтобетон в таких условиях более устойчив к старению на всех этапах – приготовления, строительства и эксплуатации, что делает его более долговечным⁵. Стабилизирующие добавки являются обязательной составляющей ЩМАС. Наличие указанных добавок в смеси позволяет обеспечить необходимый показатель стекания. За счет данных добавок исключается расслаивание смеси в процессе укладки и транспортирования. Добавки обладают структурирующим, стабилизирующим действием. Проявлением данного действия является создание препятствий для стекания, отслоения и сегрегации битумного вяжущего, гомогенизация горячих асфальтобетонных смесей. Использование добавок-стабилизаторов осуществляется для того, чтобы повысить толщину битумных пленок, а пленки, в свою очередь, создают свободный (объемный) битум и обеспечивают однородность ЩМАС. Исходно при использовании для ЩМАС стабилизирующих добавок преимущественно применялись крошка резины и асбест, обеспечивающие возможность добавления до 7% битума.

Впоследствии в силу различных причин состоялось расширение спектра используемых для стабилизации добавок. Была выяв-

⁴Баранов И.А. Оценка эффективности стабилизирующих добавок для улучшения структуры и свойств щебеночно-мастичного асфальтобетона: дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2015. С. 176.

⁵Костин В.И. Щебеночно-мастичный асфальтобетон для дорожных покрытий: учеб. пособие. Н. Новгород: ННГАСУ. 2009. 65 с.

лена возможность противодействия расслоению смеси, сдерживания значительного объема битума в смеси за счет производных кремниевой кислоты, термопластов, волокон (полимерных, минеральных, целлюлозных).

В основном стабилизирующей добавкой в ЩМАС является целлюлозное волокно (которое может быть как гранулированным, так и негранулированным)⁵

Требования к физическим свойствам к во-

локнистым стабилизирующим добавкам регламентируются ГОСТ Р 58406.1-2020³. Наличие ленточной структуры нитей – требование, предъявляемое применительно к структуре волокна. В волокне не должны присутствовать посторонние включения, нераздробленные скопления, пучки. Необходимо использовать однородное волокно.

В табл. 1 представлены значения физических свойств волокна.

Таблица 1. Требования к физическим свойствам волокна

Table 1. Requirements for the physical properties of the fiber

Показатель	Значение
Влажность, % по массе, не более	8,0
Термостойкость при температуре 220 °С по изменению массы при прогреве, %, не более	7,0

Согласно ГОСТ Р 58406.1-2020³, не запрещено применять другие добавки, которые способны сорбировать битум при технологических температурах, не давая негативного воздействия на вяжущее и ЩМА смесь.

В современных технологиях производства щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей широким распространением характеризуются добавки – стабилизаторы на основе целлюлозы, а также хризотилового и базальтового волокон. Добавка целлюлозы применяется в форме фибриллированного волокна или гранул при наличии содержания короткого волокна, являющегося однородным, длиной 0,5–1,9 мм минимум 50%. Волокна в виде гранул с обработкой модифицирующим составом или в отсутствие подобной обработки представляют собой гранулированные добавки⁵.

Сегодня при производстве ЩМАС осуществляется активное использование стабилизирующих добавок, основа которых – базальтовое, хризолитовое волокно, целлюлоза.

Возможно применение целлюлозы в таких видах, как гранулы или измельченное – фибриллированное – волокно. Волокна, сжатые в гранулы и подвергнутые обработке модифицирующими составами или без них, являются гранулированными добавками. Волокно целлюлозы, являющееся короткофиберным, должно включать минимум 50% фибр длиной 0,5–1,9 мм и характеризоваться однородностью⁵.

При проведении исследования для сравнения были использованы 4 стабилизирую-

щие добавки.

1. «Хризотоп» – запатентованная гранулированная добавка, состоящая из хризотилового волокна (85%) и битума (15%). Выпускается по СТО 72376975-001-2009⁶. Стандарт организации согласован Федеральным дорожным агентством Росавтодор. Добавка «Хризотоп» запатентована, имеет санитарно-эпидемиологическое заключение и сертификат соответствия в области дорожного хозяйства⁷.

2. Модификацией добавки «Хризотоп» является «Стилобит». Для того чтобы выпускать гранулированную добавку «Стилобит», используют пропитанное дорожным битумом минеральное волокно высокого качества. Данная добавка включает битум, базальтовое и хризолитовое волокно (15, 30 и 55% соответственно).

Комбинированное минеральное волокно, входящее в состав добавки, повышает усталостную прочность асфальтобетона и препятствует процессу образования колеи – это увеличивает жизненный срок покрытия и, следовательно, уменьшает затраты на ремонт.

Кроме этого, волокно более битумоемкое по сравнению с целлюлозным – расход «Стилобита» будет меньше, при этом цена добавки существенно ниже известных импортных целлюлозных аналогов.

Все это позволяет достичь почти двукратной экономии при выпуске асфальта. Данная добавка характеризуется наличием значительной термостойкости. Перегрев не

⁶СТО 72376975-001-2009 Гранулированный стабилизатор «Хризотоп» для ЩМАС. Технические условия // Информпроект [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iprossoft.ru/docs/?nd=1200109780> (27.11.2022).

⁷Стабилизирующая добавка для ЩМА // [Электронный ресурс]. URL: Хризотоп [Электронный ресурс]. URL: <http://www.chryzotop.ru/> (27.11.2022).

ведет к изменению его свойств. Возможно увеличение периода использования, хранения, поскольку «Стилобит» стоек к воздействию воды, не подвержен гниению [11].

3. «Viator-66» – гранулированная добавка, состав которой представлен битумом и целлюлозным волокном – 34 и 66% соответственно.

Данная добавка характеризуется высокой скоростью перемешивания в случае сухого замеса и равномерным распределением гранул в смесителе. Каждое из волокон имеет полное битумное покрытие, которое защищает волокна целлюлозы от воды, обгорания на солнце или в смесителе.

Данная стабилизирующая добавка абсолютно нетоксична и безопасна в использовании, не взрывается и не растворяется в воде с температурой 20 °С и ниже. Гранулированная стабилизирующая добавка для ЩМАС «Viator-66» обладает идеальной сыпучестью, однородно распределяет волокна целлюлозы по смеси и не собирается комками⁸.

4. Гидролизный лигнин представляет из себя сложный ароматический полимер (природный), обладающий клетчатыми свойствами и возникающий в результате биосинтеза земных растительных организмов.

Ранее понятие лигнина использовалось применительно к древесине, являющейся обессмоленной, которая не растворяется при обработке ее соляной кислотой 42% или серной кислотой 72%.

Из числа полимеров по распространенности лигнин занимает вторую позицию на земле после целлюлозы. Процесс формирования лигнина сопровождается появлением между его структурными составляющими многочисленных связей.

Результатом указанного процесса является полимолекула лигнина – полимер, строение которого является нерегулярным.

Как отмечает Фрейденберга, указанная молекула представлена в виде молекулы, которая образуется из повторяющихся мономеров, которые необязательно являются одноклеточными.

Доля лигнина от массы в соломе злаков, лиственных и хвойных породах – 12–20, 14–25, 23–38%.

Лигнин заполняет пространство между клетками, присутствует в стенках клеток. Лигнин, соответственно, обеспечивает скрепление волокон целлюлозы.

При переработке растительных волокон с использованием физико-химических методов происходит рост химической активности и одновременно многократное снижение молекулярной массы.

При обработке с использованием серной или соляной кислоты в концентрированном виде лесоматериалов происходит образование гидролизного лигнина. При этом давление поддерживается на уровне 1216–1418 кПа, температура – 180–185 °С.

Лигнин в абсолютно сухой форме имеет теплотворную способность 5500–6500 ккал/кг. Лигнин с точки зрения физико-химической характеристики является полидисперсной системой, с частицами, размеры которых составляют от нескольких микронов до нескольких мл.

Структура нитей в указанной системе – ленточная. Согласно результатам проведенных исследований, распределение фракций является следующим: менее 1 мкм – 0,2–4,3%, менее 250 мкм – 17–46%, более 250 мкм – 54–80% [12].

При проведении данного исследования был использован материал, отобранный с территории бывшего Тулунского гидролизного завода, высушенный в сушильном шкафу и просеянный через сито 2 мм для удаления посторонних крупных включений.

При увеличении гидролизного лигнина под микроскопом (40х) отчетливо видна ленточная структура нитей (рис. 1) [12].

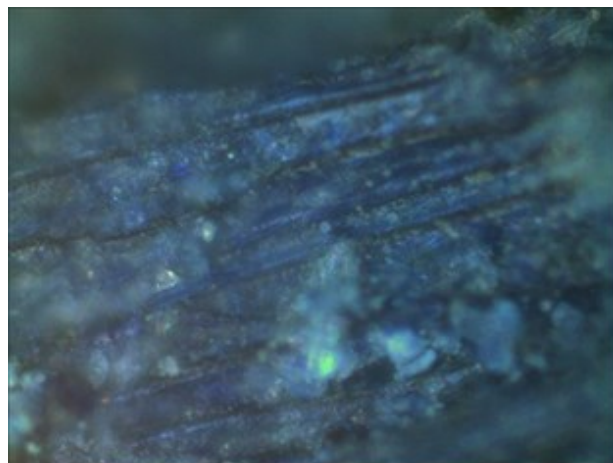


Рис. 1. Гидролизный лигнин под микроскопом 40х
Fig. 1. Hydrolytic lignin under a 40x microscope

⁸Стабилизирующая добавка для ЩМА смесей Viator-66 // ПАСТОМ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.щма.рф/> (27.11.2022).

Таблица 2. Показатели гидролизного лигнина
Table 2. Requirements for the physical properties of the fiber

Наименование показателя	Требования ГОСТ Р 58406.1-2020[1]	Фактические значения
Влажность, % по массе	не более 8,0	6,58
Термостойкость $t = 220$ °С по изменению массы при прогреве, %	не более 7,0	2,79
Содержание волокон длиной 0,1 мм–2,0 мм, %	–	92

При рассмотрении лигнина как стабилизирующей добавки, он полностью соответствует требованиям ГОСТ Р 58406.1-2020³, по влажности, термостойкости при температуре 220 °С и однородности волокон, приведенным в табл. 2.

При проведении исследования были использованы прошедшие поверку средства измерений и аттестованное лабораторное оборудование, а также применены официально признанные методы исследования физико-механических характеристик асфальтобетонных смесей, таких как определение показателя стекания вяжущего согласно приложению ГОСТ Р 58406.1-2020³, определения показателя объемной плотности в соответствии с ГОСТ Р 58401.10⁹ на изготовленных согласно ГОСТ Р 58406.9¹⁰ образцах, показателя максимальной плотности ГОСТ Р 58401.16¹¹, показателя содержания воздушных пустот в соответствии с ГОСТ Р 58406.10¹², показателя коэффициента водостойкости по ГОСТ Р 58401.18¹³, показателя средней глубины колеи ГОСТ Р 58406.3¹⁴.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Руководствуясь ГОСТ Р 58406.10¹¹ и ГОСТ Р 58406.1-2020³, запроектированы различные составы ЩМА-16, в которых для обеспечения показателя стекания вяжущего применены различные стабилизирующие добавки, в том числе: «Хризотоп», «Стилобит», «Vi-

атор-66», гидролизный лигнин.

При приготовлении асфальтобетонных смесей предварительно были определены зерновые составы и физико-механические показатели всех применяемых минеральных материалов, физико-химические свойства битума, а также нормируемые показатели стабилизирующих добавок, т.е. проведена оценка и подтверждена их пригодность для проектирования состава ЩМА-16.

Минеральная часть ЩМА-16 подбиралась таким образом, чтобы зерновой состав смеси удовлетворял требованиям ГОСТ Р 58406.1-2020³ для ЩМАС.

Расчетным путем определено первоначальное содержание битума в смеси. Затем, в результате опытных замесов проб с содержанием битума на 0,5% менее, 0,5% более и 1% более первоначального построены графики зависимости свойств от содержания битума.

По графикам методом интерполяции определено оптимальное содержание вяжущего, которое составило 6,4%.

Количество стабилизирующей добавки в каждом конкретном случае подбиралось таким образом, чтобы обеспечить оптимальный показатель стекания вяжущего, близкий к 0,10%. Полученные составы ЩМА-16 представлены в табл. 3. Как видно из табл.3, составы различаются только содержанием стабилизирующих добавок.

⁹ГОСТ Р 58401.10-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Методы определения объемной плотности. М.: Стандартинформ, 2019. 7 с.

¹⁰ГОСТ Р 58406.9-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод приготовления образцов уплотнителем Маршалла. М.: Стандартинформ, 2019. 7 с.

¹¹ГОСТ Р 58401.16-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения максимальной плотности. М.: Стандартинформ, 2019. 6 с.

¹²ГОСТ Р 58406.10-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Правила проектирования. М.: Стандартинформ, 2020. 17 с.

¹³ГОСТ Р 58401.18-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения водостойкости и адгезионных свойств. М.: Стандартинформ, 2019. 7 с.

¹⁴ГОСТ Р 58406.3-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения стойкости к колееобразованию прокатыванием нагруженного колеса. М.: Стандартинформ, 2020. 12 с.

Таблица 3. Составы асфальтобетонных смесей ЩМА-16

Table 3. Composition's of asphalt concrete mix SMA-16

Материал	Состав минеральной части смеси (битум, стабилизирующая добавка сверх 100%) с применением стабилизирующей добавки, % по массе			
	«Хризотоп»	«Стилобит»	«Viatop-66»	Гидролизный лигнин
Щебень фракции 8-16 мм ГОСТ 32703-2014 ¹⁵	69	69	69	69
Щебень фр. 4-8 мм ГОСТ 32703-2014 ¹⁵	5	5	5	5
Песок из отсевов дробления ГОСТ 32730-2014 ¹⁶	19	19	19	19
Минеральный порошок ГОСТ 32761-2014 ¹⁷	7	7	7	7
Битум БНД 100/130 ГОСТ 33133-2014 ¹⁸	6,4	6,4	6,4	6,4
Стабилизирующая добавка	0,4	0,4	0,5	0,7

При лабораторных замесах тщательно контролировались физико-механические свойства всех компонентов, температура нагрева минеральных материалов и битумного вяжущего. После приготовления проб в лаборатории перед испытаниями смеси термостатировались в сушильном шкафу не менее 2 ч при заданной температуре.

Главная задача стабилизирующей добавки – обеспечить устойчивость смеси к расслаиванию.

Метод стекания вяжущего позволяет выявлять устойчивость к расслаиванию. Применение данного метода предполагает определение способности смеси к удержанию в процессе ее загрузки, выгрузки, транспортирования битумного вяжущего. Смесь размещается в стакане из стекла, стакан опрокидывается, и требуется выявлять количество смеси, остающейся на стенках. При определении устойчивости в отношении расслаивания показатель стекания должен составлять по массе пробы максимум 0,2%. Рекомендуемый диапазон – 0,07–0,15%.

В результате опытных испытаний выявлено, что оптимальный средний показатель в районе 0,10% достигается при содержании Хризотоп 0,4%, стилобит 0,4%, виатоп-66 0,5%, гидролизного лигнина 0,7%.

Из полученных смесей были изготовлены образцы цилиндрической формы с использованием уплотнителя Маршала при температу-

ре 160 °С, которые были использованы для определения объемной плотности. Путем выявления присущей образцам массы в воде, на воздухе получены объемные плотности.

Для проведения испытаний на определение максимальной плотности пробы смесь размельчают ручным способом, пальцами рук отделяя крупные и мелкие частицы смеси. В контексте данного контроля качества, необходимо обеспечить, чтобы диаметр агрегатов, образованных из отдельных мелких частиц, не превышал 6,3 мм. Полученные пробы помещались в вакуумный пикнометр, где при помощи вакуума и вибрации удалялись воздушные пузырьки. Определив массу пробы на воздухе, а также в воде после испытания, получены максимальные плотности. Из данных показателей вычисляют содержание воздушных пустот, а также пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ). Полученные данные полностью удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 58406.1-2020³. Далее для каждого состава изготавливались по 2 серии образцов на уплотнителе Маршала с определенным содержанием воздушных пустот и определены показатели водостойкости. Суть данного метода заключается в измерении предела прочности при непосредственном растяжении нескольких образцов, на которые было оказано воздействие воды и прошли цикл замораживания-оттаивания, а также образцов, выдержанных на воздухе при температуре (22 ± 3) °С, с целью определения

¹⁵ГОСТ 32703-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2019. 11 с.

¹⁶ГОСТ 32730-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Песок дробленый. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2019. 7 с.

¹⁷ГОСТ 32761-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Порошок минеральный. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2019. 9 с.

¹⁸ГОСТ 33133-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2019. 7 с.

и сравнения значений данных параметров¹². Также были проведены лабораторные испытания по определению средней глубины колеи, которая, согласно ГОСТ 58406.1-2020³, является основным показателем (эксплуатационным) ЩМА. Определение средней глубины колеи проводилось в условиях лаборатории на специальной установке.

Основное назначение данного метода заключается в оценке стойкости испытуемого образца путем проведения циклических испытаний на прочность.

В ходе этого процесса нагруженное колесо прокатывается по поверхности образца при заранее установленной температуре, и после выполнения 10 000 циклов нагрузки (или до тех пор, пока не будет достигнуто предельное

значение) глубина образовавшейся колеи измеряется с целью определения стойкости к образованию колеи¹³.

Испытания проводятся в следующем порядке: из ЩМА смеси изготавливаются не менее двух образцов-плит на вальцовом уплотнителе, затем образцы подвергаются нагружению колесом на стенде. Испытательной установкой автоматически фиксируется полученные результаты и рассчитывается среднеарифметическое значение с точностью до 0,1 мм.

Таким образом, определены все основные физические и эксплуатационные показатели ЩМА-16. Все показатели полностью удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 58406.1-2020³ и сведены в табл. 4.

Таблица 4. Основные физические и эксплуатационные показатели ЩМА-16

Table 4. The main physical and environmental indicators of SMA-16

Показатель	ГОСТ Р 58406.1-2020	СД «Хризотол», 0,4%	СД «Стилобит», 0,4%	СД «Viator-66», 0,5%	СД Гидролизный лигнин, 0,7%
Объемная плотность, г/см ³	не нормир.	2,398	2,393	2,388	2,384
Содержание воздушных пустот, %	2,0–4,0	3,5	3,8	3,7	3,6
Пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ), %	не менее 16	16,19	16,37	16,65	16,93
Средняя глубина колеи, мм	не более 4,0	3,8	3,7	3,5	3,6
Максимальная плотность, г/см ³	не норм.	2,484	2,487	2,479	2,474
Показатель стекания вяжущего, %	не более 0,20	0,12	0,09	0,12	0,10
Водостойкость	не менее 0,85	0,92	0,94	0,93	0,95

Таким образом, все составы одинаковые, за исключением используемых стабилизирующих добавок, и полностью удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 58406.1-2020³. По полученным опытно-экспериментальным данным можно провести достоверную оценку влияния каждой стабилизирующей добавки, в том числе гидролизного лигнина, на основные физические и эксплуатационные показатели смеси ЩМА-16.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования по испытан-

ным физическим и эксплуатационным показателям получены близкие результаты. Таким образом выявлено, что стабилизирующие добавки не оказывают значительного влияния на показатели ЩМАС, не считая показатель стекания вяжущего. Незначительные расхождения в остальных показателях связаны с погрешностью при проведении испытаний, изменению зернового состава смеси ввиду различной дозировки СД, а также наличием в составе некоторых СД битума.

Отмечено незначительное повышение во-

достойности в случае применения гидролизного лигнина, возможно связанное с его способностью модифицировать дорожный битум [3–7].

Кроме того, экспериментально установлена возможность замены традиционно используемых стабилизирующих добавок на отход переработки древесины – гидролизный лигнин.

Гидролизный лигнин позволяет эффективно стабилизировать битум и удерживать его на поверхности щебня, однако его дозировка выше традиционно используемых стабилизи-

рующих добавок, в том числе добавки виатопп-66 на основе целлюлозы, также являющейся производной деревообработки.

Данный факт связан с присутствием в гидролизном лигнине различных примесей, которые могут составлять 22–60%¹⁹.

Таким образом, применение в виде добавки-стабилизатора в ЦМАС гидролизного лигнина позволит заменить традиционно применяемые в щебеночно-мастичных асфальтобетонах стабилизирующие добавки на отход переработки древесины – гидролизный лигнин и снизить экологическую нагрузку на регион.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Rabinovich M.L. Lignin by-products of Soviet hydrolysis industry: Resources, characteristics and utilization as a fuel // *Cellulose Chemistry And Technology*. 2014. Vol. 48. No. 7. P. 613–631.
2. Krutov S.M., Voznyakovskii A.P., Gordin A.A., Savkin D.I., Shugalei I.V. Environmental problems of wood biomass processing. Waste processing lignin // *Russian Journal of General Chemistry*. 2015. Vol. 85. No. 13. P. 2898–2907. <http://doi.org/10.1134/S1070363215130058>.
3. Товеницкий Ю.В., Могнонов Д.М., Аюрова О.Ж., Кузнецов Ю.Н. Модификация дорожного битума отходами производства // *Строительные материалы*. 2016. № 11. С. 59–62. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2016-743-11-59-62>. EDN: XBKBYP.
4. Xin Fu, Mao He, Yuancai Liu. Study on aging of lignin modified asphalt under thermogravimetric conditions // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 233. P. 01104. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123301104>.
5. Chi Xu, Duanyi Wang, Shaowei Zhang, Enbei Guo, Haoyang Luo, Zeyu Zhang, Huayang Yu. Effect of Lignin Modifier on Engineering Performance of Bituminous Binder and Mixture // *Polymers*. 2021. Vol. 17. No. 7. P. 1083. <https://doi.org/10.3390/polym13071083>.
6. Yi Zhang, Xuancang Wang, Guanyu Ji, Zhenyang Fan, Yuchen Guo, Wenzhe Gao, Lei Xin. Mechanical Performance Characterization of Lignin Modified Asphalt Mixture // *Applied sciences*. 2020. Vol. 10. No. 9. P. 3324. <https://doi.org/10.3390/app10093324>.
7. Дошлов О.И., Казарян А.С., Дошлов И.О. Но-

- вые аспекты утилизации технического гидролизного лигнина в качестве сырья для промышленного производства // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2014. № 11 (94). С. 205–210. EDN: TALHWF.
8. Киселёв В.П., Иванова Л.А., Шевченко В.А., Бугаенко М.Б., Кеменев Н.В. Лигнинсодержащие полимеры в асфальтобетонных смесях // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2013. № 7 (78). С. 61–68. EDN: QUUJBD.
9. Пат. 2192399, РФ, МПК C04B 26/26. Асфальтобетонная смесь / О.И. Дошлов, Г.А. Белинский, Б.Н. Гуцалюк, О.А. Балог, Б.Ф. Кухарев, А.О. Дошлова, В.А. Хорошилова; заявитель и патентообладатель ОАО «Иркутскипродорнии». № 2001103600/03; заявл. 09.02.2002; опубл. 10.11.2002.
10. Ханнакова Г.Т., Струговец И.Б., Аминов Ш.Х., Недосеко И.В. Использование промышленных отходов в составах щебеночно-мастичного асфальтобетона // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2009. № 2. С. 283–288.
11. Калинина К. Стабилизирующая добавка Стилобит // *Сумма проектов [Электронный ресурс]*. URL: <https://sumpro.ru/articles/article?id=308> (27.11.2022).
12. Balabanov V., Protsenko M. Stone mastic asphalt with the use of a stabilizing additive from hydrolytic lignin // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 667. P. 012007.

REFERENCES

1. Rabinovich M.L. Lignin by-products of Soviet hydrolysis industry: Resources, characteristics and utilization as a fuel. *Cellulose Chemistry And Technology*. 2014;48(7):613-631.

2. Krutov S.M., Voznyakovskii A.P., Gordin A.A., Savkin D.I., Shugalei I.V. Environmental problems of wood biomass processing. Waste processing lignin. *Russian Journal of General Chemistry*.

¹⁹Смирнова А.И., Демьянцева Е.Ю. Переработка и применение полимеров. Лигнины: Получение. Свойства. Переработка: учеб. пособие. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. 98 с.

2015;85(13):2898-2907.

<http://doi.org/10.1134/S1070363215130058>.

3. Tovinnitskiy Yu.V., Mogonov D.M., Ayurova O.Zh., Kuznetsov Yu.N.. Modification of road bitumen by production waste. *Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2016;11:59-62. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2016-743-11-59-62>. EDN: XBKBYP.

4. Xin Fu, Mao He, Yuancai Liu. Study on aging of lignin modified asphalt under thermogravimetric conditions. *E3S Web of Conferences*. 2021;233:01104.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123301104>.

5. Chi Xu, Duanyi Wang, Shaowei Zhang, Enbei Guo, Haoyang Luo, Zeyu Zhang, Huayang Yu. Effect of Lignin Modifier on Engineering Performance of Bituminous Binder and Mixture. *Polymers*. 2021;17(7):1083.

<https://doi.org/10.3390/polym13071083>.

6. Yi Zhang, Xuancang Wang, Guanyu Ji, Zhenyang Fan, Yuchen Guo, Wenzhe Gao, Lei Xin. Mechanical Performance Characterization of Lignin Modified Asphalt Mixture. *Applied sciences*. 2020;10(9):3324.

<https://doi.org/10.3390/app10093324>.

7. Doshlov O.I., Kazarian A.S., Doshlov I.O. New aspects of recycling technical hydrolyzed lignin as raw material for industrial production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo uni-*

versiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2014;11:205-210. (In Russ.). EDN: TALHWF.

8. Kiselyov V.P., Ivanova L.A., Shevchenko V.A., Bugaenko M.B., Kemenev N.V. Lignin containing polymers in asphalt concrete mixtures. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;7(78):61-68. (In Russ.). EDN: QUUJBD.

9. Doslov O.I., Belinsky G.A., Gutsalyuk B.N., Balog O.A., Kukharev B.F., Doshlova A.O., Khoroshilova V.A. Asphalt concrete mixture. Patent RF, no. 2001103600/03, 2002.

10. Hannanova G.T., Strugovets I.B., Aminov Sh.Kh., Nedoseko I.V. The use of industrial waste in the compositions of stone mastic asphalt concrete. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2009;2:282-288. (In Russ.). EDN: KZHGYH.

11. Kalinina K. Stabilizing additive Stylobate. Available from: <https://sumpro.ru/articles/article?id=308> [Accessed 27th November 2022]. (In Russ.)

12. Balabanov V., Protchenko M. Stone mastic asphalt with the use of a stabilizing additive from hydrolytic lignin. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2019;667:012007.

Информация об авторах

Балабанов Вадим Борисович,

к.т.н., доцент,
заведующий кафедрой автомобильных дорог,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: balabanovvb@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-2884-9674>

Молоков Владимир Сергеевич,

аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: v-mols@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-7446-2365>

Information about the authors

Vadim B. Balabanov,

Cand Sc. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Automobile Roads,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: balabanovvb@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-2884-9674>

Vladimir S. Molokov,

Postgraduate Student,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: v-mols@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-7446-2365>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 30.03.2023.
Одобрена после рецензирования 30.05.2023.
Принята к публикации 01.06.2023.

Information about the article

The article was submitted 30.03.2023.
Approved after reviewing 30.05.2023.
Accepted for publication 01.06.2023.

**Повышение надежности работы системы водоотведения
за счет аккумулирующей способности самотечных коллекторов****В.А. Бобер¹, Р.В. Чупин², Д.В. Скибо³, В.И. Дударев⁴**^{1,2,4}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия³МУП «Водоканал», г. Иркутск, Россия

Аннотация. Повышение надежности систем водоотведения обеспечивается мероприятиями и сооружениями, предотвращающими попадание неочищенных сточных вод в грунт и на поверхность земли. К таким мероприятиям относятся резервирование напорных и безнапорных трубопроводных участков сети, использование их аккумулирующей способности и устройство аварийно-регулирующих резервуаров. В работе исследуется аккумулирующая способность самотечной системы водоотведения. Предлагается алгоритм вычисления аккумулирующей емкости существующих систем водоотведения. Рассматриваются способы увеличения аккумулирующей емкости существующих систем за счет перекладки коллекторов на большие диаметры и за счет применения блокирующих устройств (типа «обратный клапан») в смотровых колодцах с целью предотвращения поступления сточных вод на поверхность земли и перевода движения сточных вод из самотечного режима в напорный. На примере имеющейся в г. Иркутске канализационно-насосной станции КНС-18 исследуется возможность аккумулирующей емкости существующих самотечных коллекторов района канализования обеспечения отключения насосной станции на время ликвидации аварии на 6 ч. На основе проведенных расчетов с целью повышения аккумулирующей способности самотечной сети до требуемых значений предлагается в пяти смотровых колодцах поставить блокирующие устройства. В статье предлагается методика расчета и формирования требуемой аккумулирующей способности проектируемых, существующих и реконструируемых СБВ. Результаты исследований будут полезны при актуализации схемы развития систем водоснабжения и водоотведения города.

Ключевые слова: централизованные системы водоотведения, аккумулирующая способность самотечных систем водоотведения, расчет и повышение надежности

Для цитирования: Бобер В.А., Чупин Р.В., Скибо Д.В., Дударев В.И. Повышение надежности работы систем водоотведения за счет аккумулирующей способности самотечных коллекторов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 213–226. <https://elibrary.ru/pcwtri>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-213-226>.

Original article**Improving reliability of a sewer system through accumulating
capacity of gravity-flow sewers****Victor A. Bober¹, Roman V. Chupin², Denis V. Skibo³, Vladimir I. Dudarev⁴**^{1,2,4}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia³MUP "Vodokanal", Irkutsk, Russia

Abstract. Improving the reliability of sewer systems involves implementing measures and facilities to prevent the discharge of untreated sewage onto the ground or surface. These measures include the redundancy of both pressurized and non-pressurized pipelines within the network, as well as the use of their accumulating capacity and emergency wastewater tanks. The accumulating capacity of a gravity-flow sewer system was examined in this work. An algorithm for calculating the accumulating capacity of existing sewer systems was proposed. Additionally, the study explored methods to enhance accumulating capacity by replacing smaller diameter manifolds with larger ones and implementing blocking devices

© Бобер В.А., Чупин Р.В., Скибо Д.В., Дударев В.И., 2023

(back-flow barriers) in control wells to prevent wastewater from reaching the surface and to transfer wastewater flow from gravity-flow to pressurized mode. In order to investigate the accumulating capacity of existing gravity-flow collectors in the sewerage handling area to maintain operations during a 6-hour pump station shutdown resulting from an accident, the sewerage pumping station-18 (SPS-18) in Irkutsk was taken as an example. On the basis of the performed calculations, it is suggested that five control wells be equipped with blocking devices in order to increase the accumulating capacity of the gravity-flow network to the required levels. The article offers a methodology for calculating and developing the required accumulating capacity of the designed, existing, and reconstructed sewer systems. The research findings can be useful for updating the development plan for the water supply and wastewater disposal systems of the city.

Keyword: centralized drainage systems, accumulating capacity of gravity drainage systems, calculation and improvement of reliability

For citation: Bober V.A., Chupin R.V., Skibo D.V., Dudarev V.I. Improving reliability of a sewer system through accumulating capacity of gravity-flow sewers. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(2):213-226. (In Russ.). <https://elibrary.ru/pcwtri>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-213-226>.

ВВЕДЕНИЕ

Особенностями устройства систем водоотведения является наличие трубопроводов с самотечным движением сточных вод. При этом, если позволяет рельеф местности, формируются бассейны водоотведения из самотечных коллекторов, через которые сточные воды от абонентов поступают на канализационные насосные станции. Далее, сточные воды перекачиваются в другие бассейны водоотведения, или на очистные сооружения. Если водопроводные системы, как правило, устраиваются в виде кольцевых и дублирующих трубопроводов, то системы водоотведения имеют древовидную структуру, как наиболее эффективную для организации движения сточных вод в самотечном режиме. Однако такие структуры не всегда обеспечивают надежную работу системы водоотведения и при выходе из строя любого участка сети, сточные воды могут оказаться на поверхности земли и нанести значительный экологический ущерб территории.

Неполадки и аварии, которые могут привести к выходу стоков на поверхность земли, следующие:

- засоры, закупорка трубопроводов;
- разломы трубопроводов, истирание стенок и образование отверстий;
- образование свищей, разрывов в напорных трубопроводах в следствие гидравлических ударов и от механических повреждений и др.;
- остановка работы насосных станций в следствие отключения электроэнергии и по другим причинам.

К мероприятиям, предотвращающим попадание сточных вод на поверхность земли, можно отнести следующие [1–5]:

1. Использование аккумулирующих емкостей безнапорных коллекторов и канализационных колодцев.

2. Устройство блокирующих устройств в колодцах, предотвращающих выход стоков на поверхность земли.

3. Устройство резервных напорных и безнапорных трубопроводов.

4. Устройство разгрузочных коллекторов постоянного и временного действия.

5. Переход на кольцевые структуры из напорных и безнапорных трубопроводов

6. Устройство аварийно-регулирующих резервуаров.

Более подробно рассмотрим первый способ – использование аккумулирующих емкостей безнапорных коллекторов и канализационных колодцев.

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

Поскольку самотечные коллектора проектируются на пропуск максимального расхода сточной жидкости при работе не полным сечением (наполнение в трубопроводе принимается в диапазоне 0,3–0,7), то всегда будет в наличии свободная емкость трубопровода. Если закупорился коллектор или был отключен на время ликвидации аварийной ситуации, то выше по течению в трубопроводах будет заполняться эта свободная емкость и емкость колодцев до момента их выхода на поверхность земли. В первую очередь стоки будут выходить на поверхность земли в колодцах, расположенных в пониженной местности. Именно эти колодцы и будут определять возможную аккумулирующую способность бассейна водоотведения. Общепринято не допускать поднятие уровня сточных вод в колодце выше 0,2 м под крышкой люка.

Очевидно, при проектировании самотечных коллекторов необходимо предусматривать их аккумулирующую емкость на время ликвидации в них засоров или проведении профилактических мероприятий. При проектировании канализационных насосных станций необходимо предусматривать аккумулирующую способность всего бассейна канализования на время возможной остановки ее работы. К сожалению, как показал проведенный анализ существующих систем водоотведения, их аккумулирующие емкости не обеспечивают хранения требуемого объема аварийных стоков.

Определение расчетной емкости

Аварийная ситуация на насосной станции может произойти в любой момент времени. Поскольку поступление сточных вод в приемный резервуар канализационно-насосной станции (КНС) контролируется, накапливаются статистические данные по часам, суткам и годам. Поэтому на основании гистограмм этих значений можно построить наиболее вероятный график поступления сточных вод в сутки максимального водопотребления.

Согласно нормативным данным время на ликвидацию аварийной ситуации принимается от 6–12 ч, например, 6 ч. Определим время возникновения аварийной ситуации, при которой потребуется наибольшая емкость аккумуляирования. Алгоритм нахождения такого

времени будет следующим. Пусть авария произошла в 0 часов, тогда потребная емкость будет равна сумме часовых расходов, поступающих в приемный резервуар от 0 до 6 часов утра. Пробегая значения начала аварии от 1, 2, ..., 24 ч, несложно вычислить для каждого случая потребную аккумулирующую емкость и в качестве расчетной принять максимальную. Далее, для этих шести часов, которые формируют максимальную емкость, необходимо провести гидравлические расчеты самотечных коллекторов рассматриваемого бассейна канализования и определить для каждого трубопровода наполнение, а затем по профилю сети, вычислить их аккумулирующую способность.

Если ее значение будет больше чем потребная емкость, то считается что самотечная система коллекторов обладает такой аккумулялирующей способностью и на время ликвидации аварии обеспечит хранения аварийных стоков без выхода их на поверхность земли. Если будет меньше, т.е. не обеспечит хранение аварийного стока, то потребуется перекладка коллекторов на большие диаметры, или установка в колодцах блокирующих устройств (типа обратных клапанов). Обратные клапана переведут в напорный режим и увеличат аккумулялирующую емкость сети [6–13].

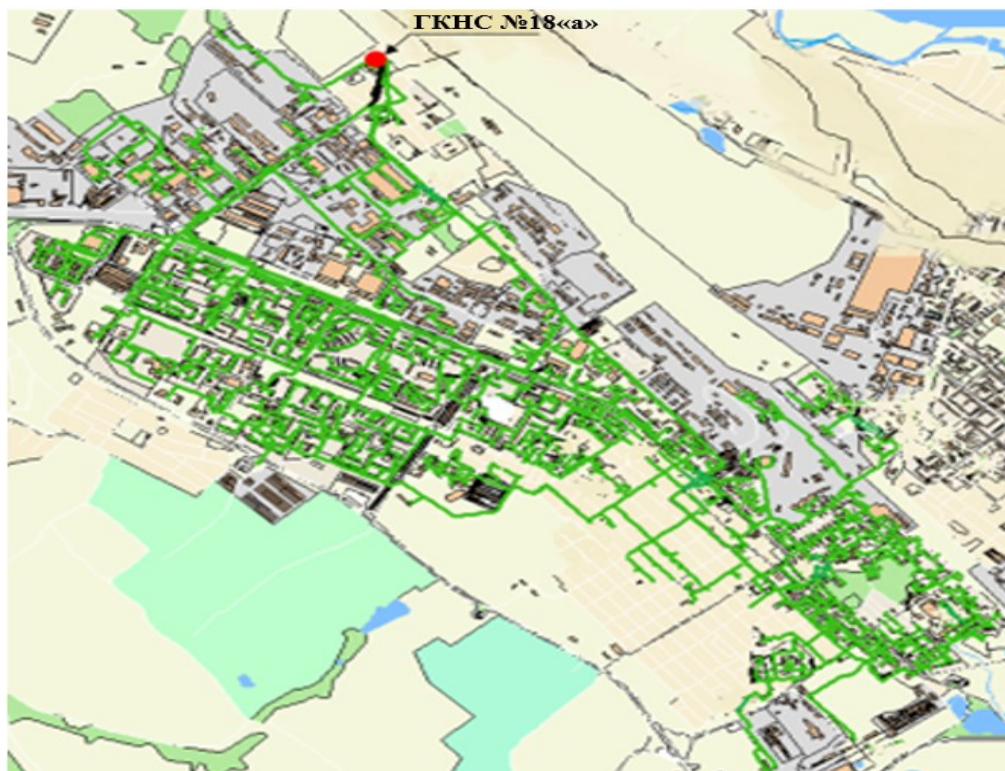


Рис. 1. Схема безнапорной системы водоотведения на канализационно-насосной станции 18-а
Fig. 1. Diagram of a non-pressurized drainage system at the sewage pumping station 18-a

ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве расчетной модели для исследования аккумулирующей способности системы водоотведения в статье рассмотрена существующая главная канализационная насосная станция (ГКНС-18а), расположенная в микрорайоне Ново-Ленино г. Иркутска. ГКНС-18а перекачивает хозяйственно-бытовые сточные воды от бассейна водоотведения на очистные сооружения Левого берега р. Ангара в количестве 17 тыс. м³/сут. Протяженность 2 напорных трубопроводов диаметром 1000 мм составляет 3,13 км каждый. Фактическая численность населения в границах бассейна водоотведения насчитывает около 100 тыс. жителей. Отведение хозяйственно-бытовых сточных вод осуществляется по полной раздельной

системе.

Поле обработке статистических данных по поступлению сточных вод в приемный резервуар КНС-18а был получен наиболее вероятный график, который представлен на рис. 2, а его числовые значения представлены в табл. 1 (столбец 3).

Определим неблагоприятное время возникновения аварийной ситуации. Для этого, начиная с 0 часа вычислим суммарный расход, поступающий на КНС за время ликвидации аварийной ситуации, т.е. за 6 ч с 0–6, затем с часу ночи, т.е. с 1–7 ч и т.д. Результаты вычислений представлены в табл. 1 (столбец 4). Как видно из таблицы максимальный аварийный расход сточных вод будет наблюдаться, начиная с 21 ч, т.е., с 21 ч–2 ч ночи.

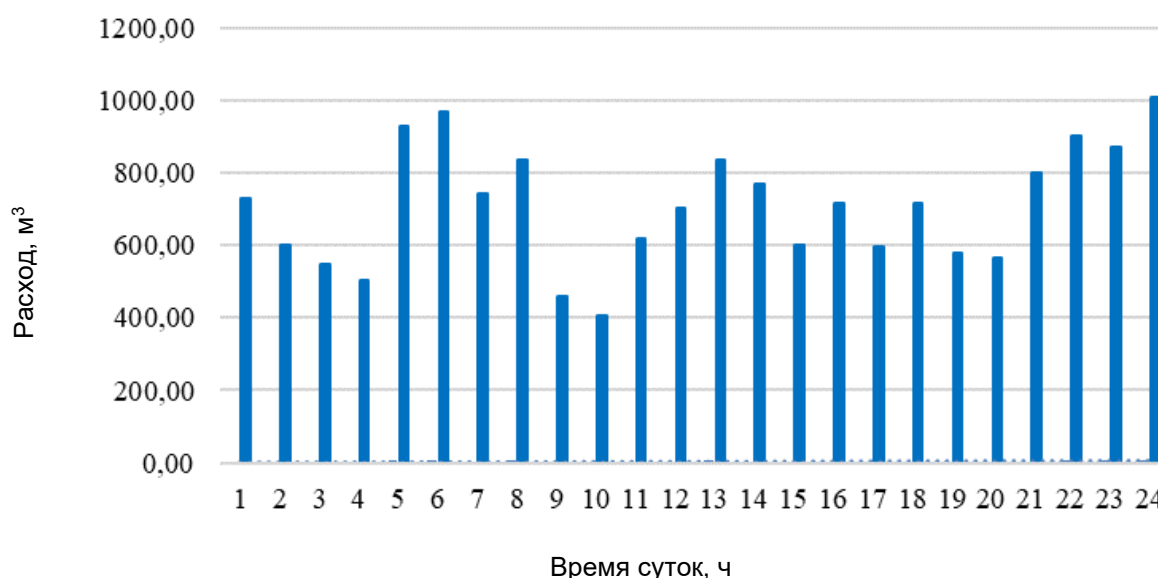


Рис. 2. График внутри суточной неравномерности притока сточных вод на канализационно-насосной станции 18-а в г. Иркутске

Fig. 2. Graph of intra-day irregularity of wastewater inflow at sewage pumping station 18-a in Irkutsk

Табл. 1. Значения неравномерности притока сточных вод на канализационно-насосной станции 18-а по часам суток

Table 1. Values of the uneven inflow of wastewater at the sewage pumping station 18-a by the hour of the day

Часы суток	Суточная неравномерность, %	Расход $Q_{\text{час}}$, м ³ /ч	Объем стоков V_6 при 6-часовой аварии, м ³
1	2	3	4
0–01	4,285	728,391	4278,662
01–02	3,536	601,050	4293,943
02–03	3,226	548,416	4526,553
03–04	2,966	504,271	4438,263
04–05	5,463	928,741	4338,762
05–06	5,693	967,793	4026,98
06–07	4,375	743,672	3763,124
07–08	4,904	833,660	3854,81

Окончание табл. 1

Часы суток	Суточная неравномерность, %	Расход $Q_{час}$, м3/ч	Объем стоков V_6 при 6-часовой аварии, м3
08–09	2,707	460,126	3790,29
09–10	2,381	404,770	3929,517
10–11	3,629	616,959	4240,913
11–12	4,141	703,937	4219,893
12–13	4,914	835,358	4233,671
13–14	4,524	769,140	3977,281
14–15	3,526	599,352	3772,772
15–16	4,213	716,166	3973,122
16–17	3,506	595,940	4156,838
17–18	4,222	717,715	4432,783
18–19	3,406	578,967	4724,544
19–20	3,321	564,632	4873,969
20–21	4,704	799,702	4910,387
21–22	5,293	899,882	4659,1
22–23	5,129	871,885	4263,49
23–24	5,938	1009,477	4320,347
Всего	100	17 000	–

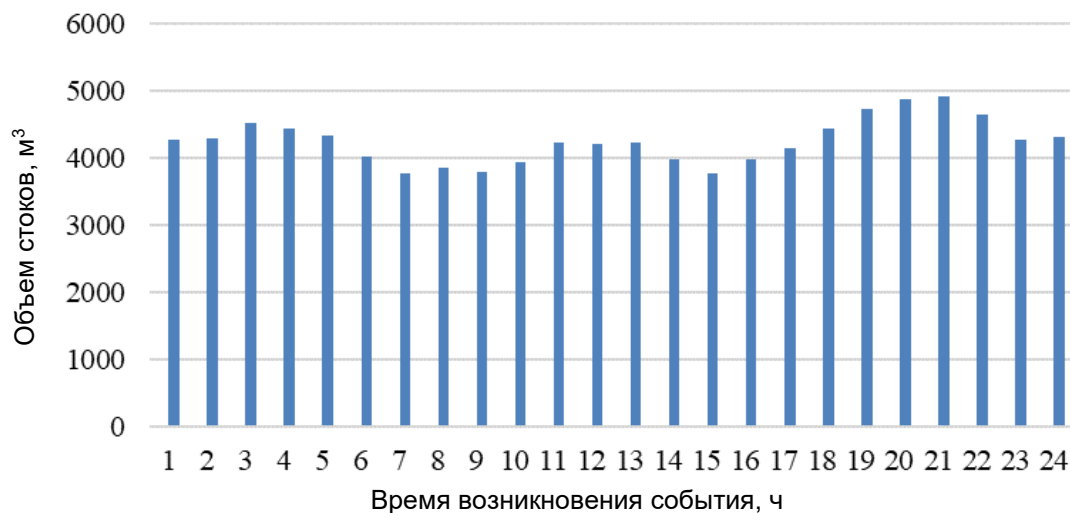


Рис. 3. График максимальных значений расходов сточных вод за 6-часовой период ликвидации аварии

Fig. 3. The graph of the maximum values of waste water consumption for the 6-hour period of liquidation of the accident

Таким образом, за время ликвидации аварийной ситуации расход сточной жидкости, поступающий от абонентов составит 4910,4 м³.

Средне часовой расход $Q_{рас}$, л/с, будет равен

$$Q_{рас} = \frac{V_{6\max}}{t_{ав}} = \frac{4910,387}{6} = 227,33, \text{ л/с.}$$

Для того чтобы этот расход не попал на поверхность земли, необходимо его зарегулировать в безнапорной сети, расположенной выше по течению от приемной

камеры КНС-18а.

Для определения аккумулирующей емкости сети, произведем ее расчет на расход 227.33 л/с и определим наполнение по каждому участку сети. Расчетная схема подводящей самотечной канализационной сети представлена на рис. 4, где по каждому колодцу указаны отметки поверхности земли и лотка трубопровода.

В табл. 2 представлены результаты расчета аккумулирующей емкости сети водоотведения.

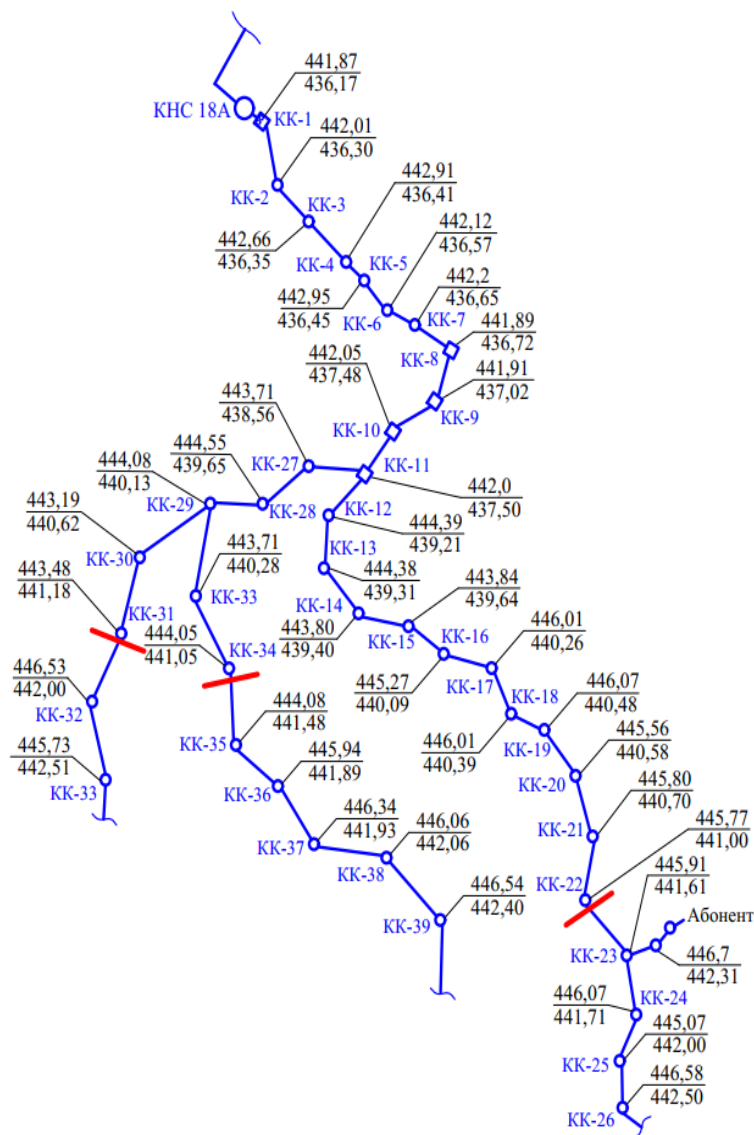


Рис. 4. Схема самотечных трубопроводов системы водоотведения
 Fig. 4. Scheme of gravity pipelines of the drainage system

Табл. 2. Расчет аккумулирующей способности сети

Table 2. Calculation of the accumulating capacity of the network

№ уч.	л/с 100%	Диаметр участка, м	Длина участка	Уклон, ‰	Глубина наполнения h, м	Площадь сечения потока, м ²	Свободная емкость участка, м ³
1–2	227,3	1,5	21,17	0,006	0,22	0,161	34,002
2–3		1,5	46,78	0,001	0,35	0,313	68,025
3–4		1,5	20,56	0,003	0,26	0,205	32,118
4-5		1,5	4,17	0,010	0,20	0,140	6,785
5-6		1,5	17,88	0,007	0,22	0,161	28,718
6-7		1,5	25,86	0,003	0,26	0,205	40,397
7-8		1,5	108,63	0,001	0,35	0,313	157,964
8-9		1,5	9	0,033	0,15	0,092	15,076
9-10		1,5	95,33	0,005	0,23	0,172	152,065
10-11		1,5	8,15	0,002	0,29	0,240	12,446

Окончание табл. 2

№ уч.	л/с 100%	Диаметр участка, м	Длина участка	Уклон, ‰	Глубина наполнения h, м	Площадь сечения потока, м ²	Свободная емкость участка, м ³
11-12	113,7 50%	1,25	104,99	0,016	0,13	0,068	121,703
12-13		1,25	6,07	0,016	0,13	0,068	7,036
13-14		1,25	69,38	0,001	0,26	0,185	72,307
14-15		1,25	49	0,005	0,18	0,109	54,791
15-16		1,25	87,42	0,005	0,18	0,109	97,752
16-17		1,25	55,62	0,003	0,20	0,127	61,192
17-18		1,25	28,23	0,004	0,18	0,106	31,651
18-19		1,25	78,5	0,001	0,26	0,185	81,811
19-20		1,25	98,5	0,001	0,26	0,185	102,655
20-21		1,25	97,4	0,001	0,25	0,175	102,483
21-22		1,25	69,6	0,0043	0,18	0,106	78,034
11-27	90,93 40%	1,00	84,56	0,013	0,13	0,060	61,340
27-28		1,00	88,57	0,012	0,13	0,060	64,249
28-29		1,00	87,13	0,006	0,16	0,081	61,374
29-30		1,00	26,95	0,018	0,12	0,053	19,738
30-31		1,00	21,33	0,026	0,11	0,047	15,750
29-34	22,73	0,80	75,56	0,002	0,11	0,042	34,807
34-35	10%	0,80	88,57	0,009	0,08	0,026	42,217
Всего по трубопроводам							1658,487
Объем колодцев и камер							137
Итого:							1795,54

Из этого следует, что определение свободной емкости самотечных коллекторов производится в диапазоне диктующих точек: точка № 1 – наименьшая горизонтальная отметка крышки люка в зоне зарегулирования; точка № 2 –

узловой канализационный колодец с присоединением от абонента. В табл. 2 представлены расчеты для аккумулирующей емкости сети при устройстве в колодцах 1–11 блокирующих устройств.

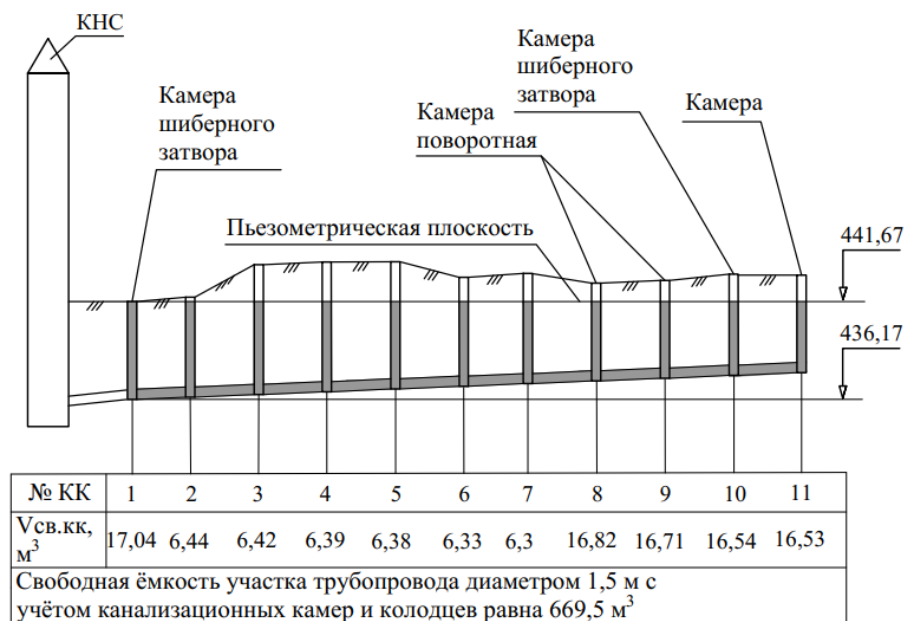


Рис. 5. Формирование аккумулирующей емкости сети (1–11 колодцы)
Fig. 5. Formation of the accumulating capacity of the network (1–11 wells)

Расчеты производились в следующей последовательности. После прикрытия шибер в приемном резервуаре КНС сточные воды от абонентов, расположенных выше по потоку, будут заполнять свободное пространство в самотечных трубопроводах и будут заполнять пространство смотровых колодцев до момента их выхода на поверхность земли из самого низко расположенного колодца (в данном случае это колодец 1). На рис. 5–8 графически показаны аккумулирующие способности участков сети, начиная с первого колодца.

Суммарная аккумулирующая способность,

представленной на рисунке 4 безнапорной системы водоотведения, будет равна $669,5 + 461 + 217,8 + 36,6 = 1384,98 \text{ м}^3$. Как уже отмечалось, при ликвидации аварии на КНС требуется аккумулировать объем стоков $4910,4 \text{ м}^3$. Следовательно, аккумулирующей способности существующей системы водоотведения $1384,98 \text{ м}^3$ хватит на время ликвидации аварии всего на 2 ч.

В своей деятельности эксплуатационный персонал должен руководствоваться этой цифрой и проводить ремонтные работы (если это возможно) не более 2 ч.

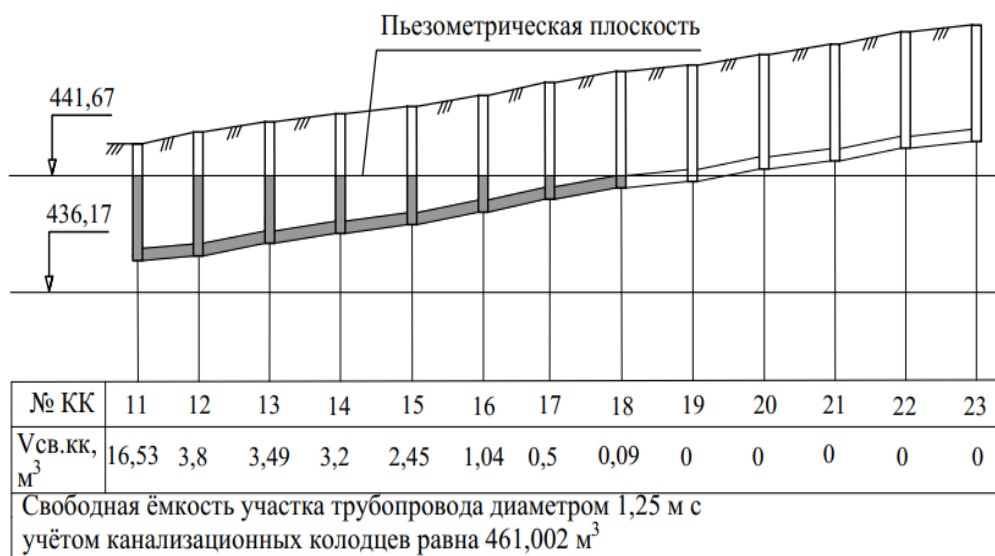


Рис. 6. Формирование аккумулирующей емкости сети (11–19 колодцы)
Fig. 6. Formation of the accumulating capacity of the network (11–19 wells)



Рис. 7. Формирование аккумулирующей емкости сети (11–31 колодцы)
Fig. 7. Formation of the accumulating capacity of the network (11–31 wells)



Рис. 8. Формирование аккумулирующей емкости сети 29–34 колодцев
Fig. 8. Formation of the accumulating capacity of the network of 29–34 wells

Однако если в этом колодце устроить блокирующее устройство [14-19] по типу, представленному на рис. 9, то при заполнении колодца сточными водами, клапан прижмется к крышке колодца и предотвратит выход сточных вод на поверхность земли. Если в последующих по высоте колодцах устраивать подобные блокирующие устройства (например, в смотровых колодцах КК 1, 2, 6, 7, 8, 9, 10, 11), то они соответственно заблокируют выходы стоков на поверхность земли и тем самым значительно увеличат аккумулирующую способность сети. В нашем случае, без таких

устройств максимальная свободная емкость сети будет равна 1384,98 м³, а при наличии блокирующих устройств в 8 колодцах она вырастет до значений 1835,74 м³ (см. расчеты в табл. 2). При этом следует принимать во внимание то, что зарегулирование сточных вод в свободной емкости самотечных коллекторов ограничивается точками подключения к ним абонентов, подтопление которых недопустимо. Применительно к исследуемой КНС 18-а, точка, ограничивающая свободную емкость сети, будет принадлежать канализационному колодцу № 22 (см. рис. 10–13).

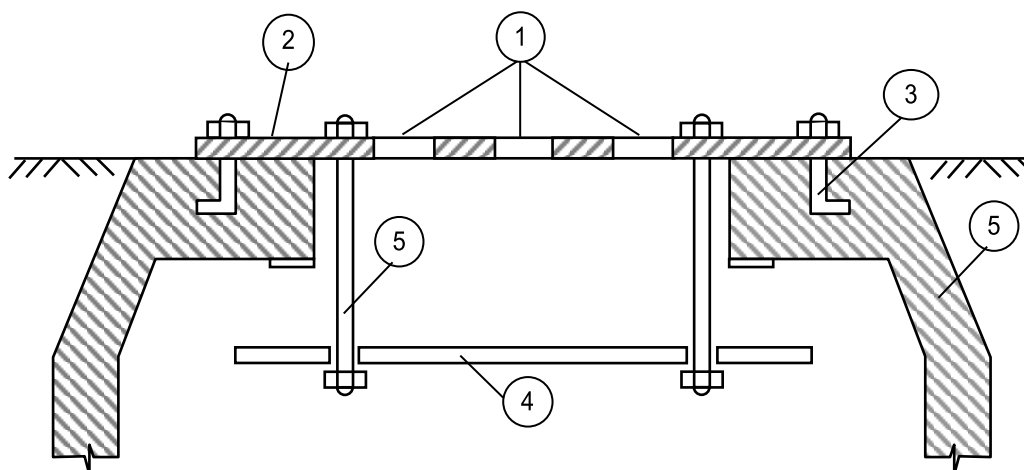


Рис. 9. Схема блокирующего устройства: 1 – отверстия для поступления воздуха, стоков; 2 – крышка колодца; 3 – анкерное крепление; 4 – подвижный клапан; 5 – направляющие подвижного клапана

Fig. 9. Diagram of the blocking device: 1 – openings for air intake, drains; 2 – well cover; 3 – anchor fastening; 4 – movable valve; 5 – guides of the movable valve

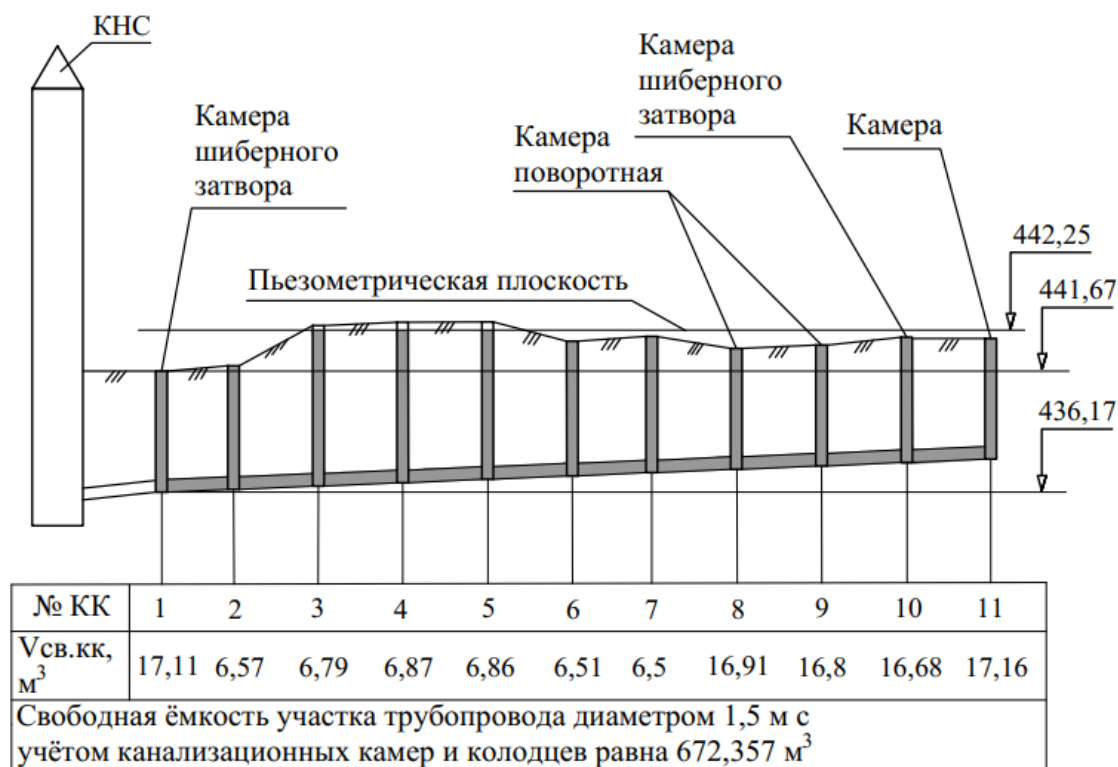


Рис. 10. Работа блокирующих устройств в 1–11 колодцах
Fig. 10. Operation of blocking devices in wells 1–11

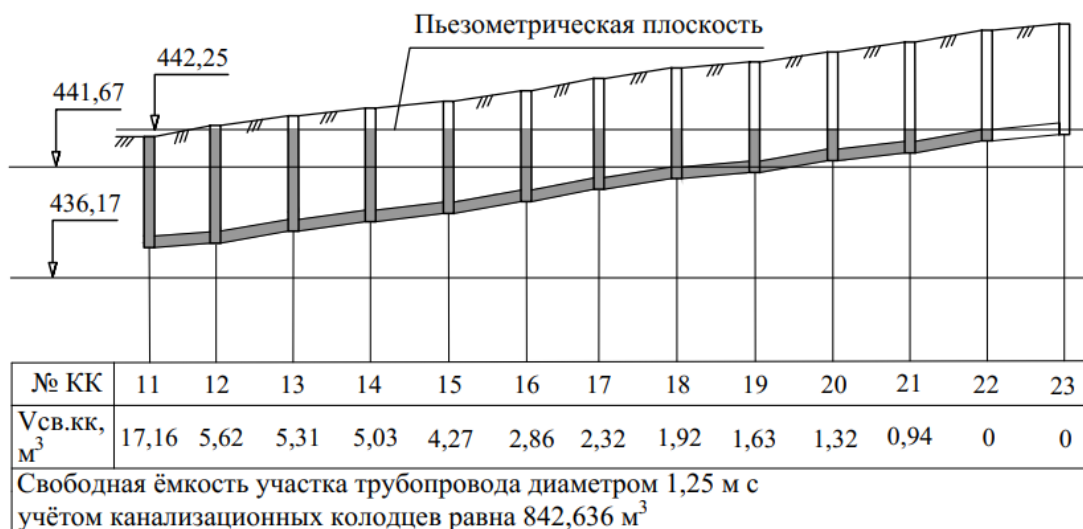


Рис. 11. Заполнение сети 11–23 колодцев
Fig. 11. Filling the network of 11–23 wells

Следует отметить, что на каждом возможном участке сети может произойти засорение и его закупорка.

В этом случае можно по аналогии определить аккумулирующую способность сети, расположенную выше по потоку движения сточной жидкости, и решить обратную задачу, сколько времени будет отпущено на ликвидацию аварийной ситуации на этом участке, пока из

соседнего колодца сточные воды начнут выливаться на поверхность земли.

Подобные расчеты можно провести для каждого самотечного участка сети. Исходя из этих расчетов, можно в определенных смотровых колодцах поставить блокирующие устройства, а можно построить кольцевые трубопроводы постоянного и временного содержания [20–25].



Рис. 12. Заполнение сети 29–34 колодцев
Fig. 12. Filling the network of 29–34 wells

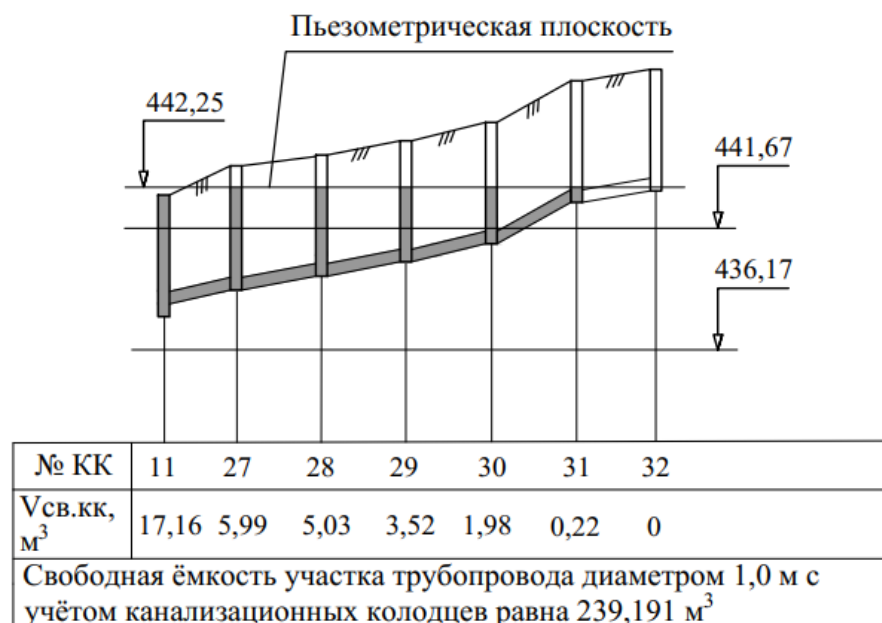


Рис. 13. Заполнение сети 11–31 колодцев
Fig. 13. Filling the network of 11–31 wells

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения надежности работы систем водоотведения эффективно использовать аккумулирующую способность самотечных коллекторов. В работе предложен алгоритм определения таких емкостей применительно к новым и существующим сетям водоотведения. Предлагается заблаговременно смоделировать отключение каждого аварийного участка

сети и вычислить по предлагаемой методике возможную аккумулирующую способность сети, определить доступное время для ликвидации аварийной ситуации и сформировать план оперативного реагирования.

Рекомендуется при проектировании новых сетей водоотведения предусматривать и рассчитывать аккумулирующую способность сети на время ликвидации аварийной ситуации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамов Н.Н. Надежность систем водоснабжения. 3-е изд. М.: Стройиздат. 1984. 216 с.
2. Саломеев В.П. Реконструкция инженерных систем и сооружений водоотведения: монография. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009. 192 с.
3. Игнатчик С.Ю., Кузнецов П.Н. Методы оценки и пути снижения сбросов сточных вод в окружающую среду // Вода и экология: проблемы и решения. 2017. № 1. С. 13–23.
4. Игнатчик С.Ю. Расчет надежности, безопасности и инвестиционной эффективности сети водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 12. С. 57–67.
5. Алексеев М.И., Ермолин Ю.А. Надежность систем водоотведения. СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2010. 166 с.
6. Алексеев М.И., Ермолин Ю.А. Вероятностные характеристики времени наработки между отказами восстанавливаемых объектов водопроводно-канализационного хозяйства // Водоснабжение и санитарная техника. 2009. № 5. С. 26–28. EDN: KGLQXN.
7. Ермолин Ю.А., Алексеев М.И. Надежность городской системы водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. 2000. № 6. С. 5–12.
8. Ермолин Ю.А., Алексеев М.И. О методологии исследования надежности стареющих элементов и систем водопровода и канализации // Водоснабжение и санитарная техника. 2002. № 9. С. 20–24.
9. Гальперин Е.М. Определение надежности функционирования кольцевой водопроводной сети // Водоснабжение и санитарная техника. 1989. № 6. С. 11–13. EDN: TVVIDH.
10. Ильин Ю.А. Надежность водопроводного оборудования и сооружений. М.: Стройиздат, 1985. 180 с.
11. Ильин Ю.А. Расчет надежности подачи воды. М.: Стройиздат, 1987. 320 с.
12. Кармазинов Ф.В., Ильин Ю.А., Игнатчик В.С., Игнатчик С.Ю. Надежность тоннельных коллекторов // Водоснабжение и санитарная техника. 1999. № 12. С. 16–19.
13. Кармазинов Ф.В., Тазетдинов Г.М., Ильин Ю.А., Игнатчик В.С., Игнатчик С.Ю. Надежность транспортировки сточных вод системы водоотведения Санкт-Петербурга // Водоснабжение и санитарная техника. 1999. № 7. С. 17–21.
14. Дрозд Г.Я. Надежность канализационных сетей // Водоснабжение и санитарная техника. 1995. № 10. С. 18–22.
15. Фридман А.А. Повышение надежности трубопроводов // Водоснабжение и санитарная техника. 1986. № 7. 30–33.
16. Иванов О.М., Харитонов В.И. Надежность магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1978. 320 с.
17. Митянин В.М. Исследование причин повреждений трубопроводов в городских системах водоснабжения // Водоснабжение и сантехника. 1979. № 2. С. 18–21.
18. Примин О.Г., Храменков С.В. Оптимизация восстановления городских водопроводных и водоотводящих сетей // ЭКВАТЭК: материалы 6-го Междунар. конгресса. М., 2004. С. 15–19.
19. Кармазинов Ф.В., Панкова Г.А., Михайлов Д.М., Игнатчик В.С., Игнатчик С.Ю., Кузнецова Н.В. Методика оценки объемов аварийных сбросов сточных вод в окружающую среду // Водоснабжение и санитарная техника. 2016. № 6. С. 49–54. EDN: WAOZSP.
20. Мороз М.В. Методика избыточных проектных схем и метод поконтурной минимизации систем группового водоснабжения и водоотведения // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 1 (36). С. 60–73. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-1-60-73>. EDN: GOPPGU.
21. Чупин Р.В., Мороз М.В. Применение автомобильного транспорта в системах группового водоснабжения и водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. 2021. № 5. С. 57–64. <https://doi.org/10.35776/VST.2021.05.07>. EDN: RDVUAL.
22. Чупин Р. В., Мороз М. В., Бобер В. А. Обоснование диаметров трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения на основе минимизации затрат их жизненного цикла // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 4. С. 52–58. <https://doi.org/10.35776/VST.2022.04.07>. EDN: CIOYJH.
23. Скибо Д.В., Чупин В.Р., Огнёв И.А. Повышение экологической безопасности систем водоотведения на основе аварийно-регулирующего резервуара // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 7. С. 43–51. <https://doi.org/10.35776/VST.2022.07.06>. EDN: FBEZYC.
24. Skibo D.V., Tolstoy M.Y., Chizhik K.I. Automated damping tank of sewage pumping stations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687. Iss. 4. P. 044030. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/687/4/044030>.
25. Чупин Р.В., Майзель И.В., Чупин Р.В., Нгуен Т.А. Оптимальная реконструкция систем водоотведения // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2014. № 5 (10). С. 86–102. EDN: RJJUPL.

REFERENCES

1. Abramov N.N. Reliability of water supply systems. 3rd ed. Moscow: Stroyizdat; 1984. 216 p. (In Russ.).
2. Salomeev V.P. Reconstruction of engineering systems and wastewater disposal facilities. Moscow:

- Associations of construction universities; 2009. 192 p. (In Russ.).
3. Ignatchik S.Yu., Kuznetsov P.N. Assessment methods and ways to reduce wastewater discharges into the environment. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya = Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2017;1:13-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2017.19.1.13-23>. EDN: ZRKPVV.
 4. Ignatchik S.Yu. Estimation of reliability, safety and investment efficiency of a wastewater disposal system. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 2011;12:57-67. (In Russ.). EDN: ONKXVX.
 5. Alekseev M.I., Ermolin Yu.A. Reliability of drainage systems. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2010. 166 p. (In Russ.).
 6. Alekseev M.I., Ermolin Yu.A. Probabilistic characteristics of operating time between failures of restored water supply and sewerage facilities. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 2009;5:26-28. (In Russ.). EDN: KGLQXN.
 7. Ermolin Yu.A., Alekseev M.I. Reliability of the urban drainage system. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 2000;6:5-12. (In Russ.).
 8. Ermolin Yu.A., Alekseev M.I. About methodology of research of reliability of aging elements and systems of water supply and sewerage. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 2002;9:20-24. (In Russ.).
 9. Gal'perin E.M. Opredelenie nadezhnosti funktsionirovaniya kol'tsevoi vodoprovodnoi seti. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 1989;6:11-13. (In Russ.). EDN: TVVIDH.
 10. Ilyin Yu.A. Reliability of water supply equipment and structures. Moscow: Stroyizdat; 1985. 180 p. (In Russ.).
 11. Il'in Yu.A. Calculation of water supply reliability. Moscow: Stroyizdat; 1987. 320 p. (In Russ.).
 12. Karmazinov F.V., Il'in Yu. A., Ignatchik V.S., Ignatchik S.Yu. Reliability of tunnel collectors. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 1999;12:16-19. (In Russ.).
 13. Karmazinov F.V., Tazetdinov G.M., Il'in Yu.A., Ignatchik V.S., Ignatchik S.Yu. Reliability of wastewater transportation of the Saint-Petersburg wastewater disposal system. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 1999;7:17-21. (In Russ.).
 14. Drozd G.Ya. Reliability of sewer networks. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 1995;10:18-22. (In Russ.).
 15. Fridman A.A. Improving the reliability of pipelines. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 1986;7:30-33. (In Russ.).
 16. Ivanov O.M., Kharitonov V.I. Reliability of main pipelines. Moscow: Nedra; 1978. 320 p.
 17. Mityanin V.M. Investigation of the causes of pipeline damage in urban water supply systems. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 1979;2:18-21. (In Russ.).
 18. Primin O.G., Khramenkov S.V. Optimization of urban water supply and drainage networks restoration // EKWATEK: materials of the 6th International Congress. Moscow; 2004. p. 15-19.
 19. Karmazinov F.V., Pankova G.A., Mikhailov D.M., Ignatchik V.S., Ignatchik S.Iu., Kuznetsova N.V. Method of evaluating the amount of emergency wastewater discharges into the environment. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 2016;6:49-54. (In Russ.). EDN: WAOZSP.
 20. Moroz M.V. The method of redundant design schemes and the method of contour minimization of group water supply and sewerage systems. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(1):60-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-1-60-73>. EDN: GOPPGU.
 21. Chupin R.V., Moroz M.V. The use of road transport in the systems of group water supply and wastewater disposal. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 2021;5:57-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.35776/VST.2021.05.07>. EDN: RDVUAL.
 22. Chupin R.V., Moroz M.V., Bober V.A. Substantiation of the diameters of pipelines of water supply and wastewater disposal systems based on minimizing the costs of their life cycle. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 2022;4:52-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.35776/VST.2022.04.07>. EDN: CIOYJH.
 23. Skibo D.V., Chupin V. R., Ognev I. A. Povyshenie ekologicheskoi bezopasnosti sistem vodootvedeniya na osnove avariino-reguliruyushchego rezervuara. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 2022;7:43-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.35776/VST.2022.07.06>. EDN: FBEZYC.
 24. Skibo D.V., Tolstoy M.Y., Chizhik K.I. Automated damping tank of sewage pumping stations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;687(4):044030. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/687/4/044030>.
 25. Chupin R.V., Maizel' I.V., Chupin R.V., Nguen T.A. Effective reconstruction of water disposal systems. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2014;5(10):86-102. (In Russ.). EDN: RJJUPL.

Информация об авторах

Бобер Виктор Антонович,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: viktorbober200400@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-8340-6222>

Чупин Роман Викторович,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры городского
строительства и хозяйства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: ch-r-v@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6163-9091>

Скибо Денис Владимирович,
мастер участка канализации,
МУП «Водоканал»
664081, г. Иркутск, ул. Станиславского, 2,
Россия,
e-mail: d.skibo2013@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-3280-4324>

Дударев Владимир Иванович,
д.т.н, профессор,
профессор кафедры химии и биотехнологии
им. В.В. Тутуриной
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: vdudarev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2378-7574>

Information about the authors

Victor A. Bober,
Graduate Student,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: viktorbober200400@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-8340-6222>

Roman V. Chupin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department
of Urban Construction and Economy,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: ch-r-v@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6163-9091>

Denis V. Skibo,
Master of the Sewer Section,
MUE "Vodokanal"
2 Stanislavsky St., Irkutsk 664081,
Russia,
e-mail: d.skibo2013@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-3280-4324>

Vladimir I. Dudarev,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Chemistry
and Biotechnology named after V.V. Tuturina,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: vdudarev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2378-7574>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 14.03.2023.
Одобрена после рецензирования 04.04.2023.
Принята к публикации 07.04.2023.

Information about the article

The article was submitted 14.03.2023.
Approved after reviewing 04.04.2023.
Accepted for publication 07.04.2023.



Испытания металлических гидрошпонок для гидроизоляции технологических швов

А.В. Васильев^{1✉}, В.А. Савватеев², Н.И. Фомин³, В.В. Антипин⁴

^{1,2,3}Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

⁴ООО «ЛСР. Строительство-Урал», г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. В строительной практике России достаточно мало информации, посвященной изучению и применению металлических гидрошпонок технологических швов. Цель работы заключается в изучении работы и эффективности металлических гидрошпонок, предназначенных для гидроизоляции технологических швов. В статье представлены результаты экспериментального исследования металлических гидрошпонок из оцинкованного листа, установленных в емкостную конструкцию из монолитного железобетона, изготовленную в заводских условиях. Для обеспечения различных условий воздействия на гидрошпонку емкостная конструкция была изготовлена с двумя разноуровневыми технологическими швами по ее периметру. В результате заполнения емкости водой и наблюдения за гидрошпонками в специально изготовленных полостях было определено, что шпонки, установленные на эпоксидный клей, не обеспечивают герметичность, в отличие от шпонок, установленных при помощи силиконового герметика. Также экспериментально выявлены некоторые технологические достоинства и недостатки металлических гидрошпонок. Среди недостатков отмечена относительно высокая трудоемкость ее монтажа, в частности, стыковки элементов по длине. Среди основных технологических достоинств необходимо отметить собственную жесткость изделия. При этом необходимо дальнейшее изучение химического поведения металла гидрошпонки в теле бетона. В частности, необходимо выполнить эксперименты с повышенным давлением воды и исследовать поведение стали, изучить влияние геометрии гидрошпонки и химической активности «бетон конструкции – металл гидрошпонки» на величину предельного сопротивления гидростатическому давлению.

Ключевые слова: гидроизоляция, технологический шов, металлическая гидрошпонка, поливинилхлоридная гидрошпонка

Для цитирования: Васильев А.В., Савватеев В.А., Фомин Н.И., Антипин В.В. Испытания металлических гидрошпонок для гидроизоляции технологических швов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 227–238. <https://elibrary.ru/gkcbis>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-227-238>.

Original article

Testing of metal waterstops for waterproofing tack welds

Alexander V. Vasilev^{1✉}, Vitalii A. Savvateev², Nikita I. Fomin³, Vladimir V. Antipin⁴

^{1,2,3}Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

⁴LLC "LSR. Construction-Ural", Yekaterinburg, Russia

Abstract. The existing information on the study and application of tack weld metal waterstops in Russian construction practice is limited. The authors of the present paper investigate the operation and effectiveness of metal waterstops designed for waterproofing tack welds. An experimental study of metal waterstops made of zinc-coated sheets and installed in a factory-fabricated capacitive monolithic reinforced concrete structure was conducted. In order to provide different exposure conditions for a waterstop, a vessel structure was manufactured with two split-level tack welds on its perimeter. As a result of filling the vessel with water and monitoring the waterstops through special cavities, it was determined that the

waterstops mounted with epoxy glue did not provide sufficient sealing, unlike those mounted with a silicone sealant. In addition, some technological advantages and disadvantages of metal waterstops were experimentally revealed. The disadvantages included a relatively high labor intensity of their installation, in particular, joining the elements along the length. The main technological advantage consisted in the inherent rigidity of the product. Further research should investigate the chemical behavior of the waterstop metal in the concrete body. To this end, the steel behavior under increased water pressure and the influence of the waterstop geometry and the chemical activity of the "structural concrete – waterstop metal" complex on the value of the hydrostatic pressure resistance limit should be elucidated.

Keywords: waterproofing, technological seam, polyvinyl chloride waterstops, metal waterstops

For citation: Vasilev A.V., Savvateev V.A., Fomin N.I., Antipin V.V. Testing of metal waterstops for waterproofing tack welds. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2023;13(2):227-238. (In Russ.). <https://elibrary.ru/gkcbis>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-227-238>.

ВВЕДЕНИЕ

Гидроизоляционная система является важной составляющей эксплуатационной надежности зданий и сооружений, обеспечивающей качество микроклимата внутри помещений и одновременно поддерживающая конструкционную надежность различных элементов зданий и сооружений от воздействия влаги.

Гидроизоляционная система включает в себя пять основных областей:

- гидроизоляция технологических швов;
- гидроизоляция деформационных швов;
- гидроизоляция отверстий от опалубки;
- гидроизоляция вводов коммуникаций;
- гидроизоляция различных поверхностей.

В данной статье будет исследована эффективность гидроизоляции технологических швов монолитных конструкций при использовании металлических гидрошпонок. На данный момент при устройстве гидроизоляции технологических швов на отечественном рынке в основном используют поливинилхлоридные (ПВХ) гидрошпонки, но также малоизученные гидрошпонки из металла, поскольку последние имеют некоторые важные преимущества:

1) низкая стоимость (табл. 1)¹;

2) удобство монтажа вследствие собственной жесткости изделия.

Основное преимущество ПВХ гидрошпонок – обеспечение возможности создания сложных контуров конструкций благодаря технологической сварке соединений в горизонтальной и в вертикальной плоскости (рис. 1).

Как показывает практика, основным

недостатком ПВХ гидрошпонок является значительный объем брака, обусловленный неправильной установкой и фиксацией данных изделий на строительной площадке. Например, при фиксации внутренней гидрошпонки, согласно регламенту производителя «ТР-187-07, АКВАСТОП»², требуется не менее трех скоб на один погонный метр. При несоблюдении данных правил вероятен наклон (деформация) или потеря устойчивости гидрошпонки, из-за чего произойдет потеря ее эксплуатационных качеств. Данный эффект возникает вследствие недостаточной собственной жесткости изделия, а также необходимости частого крепежа (рис. 2). Еще одним недостатком таких гидрошпонок, отмеченный на практике, является достаточно высокие требования к контролю качества сварки стыков, которые содержатся в технологических регламентах заводов-изготовителей.

Качество устройства таких изделий в значительной степени зависит от квалификации исполнителей, таким образом, технологическую надежность их монтажа нельзя считать высокой (рис. 3).

Также следует отметить, что ПВХ гидрошпонки чувствительны к воздействию ультрафиолетового излучения. Это может снизить их номинальные эксплуатационные качества (заявленные производителем), особенно в летнее время: при длительном хранении материала на открытых приобъектных складах и при долговременных технологических перерывах в бетонировании, например, когда часть

¹Гидрошпонка ХВН-120 (2хØ4) ПВХ // Enix.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://enix.ru/gidroshponka-hvn-120-2ho4> (03.12.2022);

Лист оцинкованный 1,5 мм // Metal-b2b.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://www.metal-b2b.ru/metall/list-ozinkovannyj/list-ozinkovannyj-15-mm> (03.12.2022).

²ТР 186-07. Технологический регламент на установку гидроизоляционных шпонок АКВАСТОП при устройстве и восстановлении гидроизоляции деформационных и технологических швов бетонирования в железобетонных конструкциях подземных и заглубленных сооружений. М.: Типография строительной отрасли города, 2008.

монолитной конструкции уже забетонирована, а другая часть гидрошпонки находится на открытом воздухе [1].

Отмеченные выше недостатки отсутствуют у металлических гидрошпонок.

Таблица 1. Показатели рыночных цен гидроизоляционных материалов технологических швов
Table 1. Indicators of market prices for waterproofing materials of technological seams

Материал гидрошпонки	Примерная рыночная цена материала (на 03.12.2022 г.)
Из ПВХ (АКВАСТОП ХВН 120х4)	512 руб/п. м ($h = 120$ мм)
Из оцинкованной листовой стали (ОЦ Б-О-1,5х200, ГОСТ 19904-90; Ст3, ГОСТ 14918-80)	175 руб/п. м ($h = 200$ мм)
Из оцинкованной листовой стали (ОЦ Б-О-1,5х400, ГОСТ 19904-90; Ст3, ГОСТ 14918-80)	350 руб/п. м ($h = 400$ мм)



Рис. 1. Соединение поливинилхлоридных гидрошпонок
Fig. 1. Connection of polyvinyl chloride waterstops



Рис. 2. Наклон внутренней поливинилхлоридной гидрошпонки
Fig. 2. Inclination of the inner polyvinyl chloride waterstop



Рис. 3. Процесс сварки поливинилхлоридной гидрошпонки
Fig. 3. Polyvinyl chloride waterstop welding process

На сегодняшний день на международном рынке применяется несколько типов металлических гидрошпонок³, среди которых отдельно стоит отметить шпонки с адгезионной пленкой⁴. Согласно исследованию [2], адгезионная пленка на поверхности гидрошпонки значительно увеличивает эффективность гидростатического сопротивления благодаря эффекту «склеивания» на границе «гидрошпонка – бетон». Так, исследователи в работе [2] демонстрируют результаты испытаний, где отмечается, что благодаря адгезионной пленке ПВХ гидрошпонка выдержала давление в 30 м водяного столба по сравнению с заявленным производителем давлением в 10 м (для изделия без пленки). При этом обстоятельных исследований, посвященных работе металлических гидрошпонок с адгезионной пленкой, авторами обнаружить не удалось. Отечественных и зарубежных исследований эффективности металлических гидрошпонок, включая оценку их эксплуатационных качеств внутри конструкций, в целом мало, что подчеркивает актуальность их выполнения.

Вместе с этим накоплено уже достаточно много данных по возможностям применения ПВХ гидрошпонок, разработана отечественная нормативная технологическая база, например, СТО НОСТРОЙ 2.7.156-2014 (Устройство водонепроницаемых конструкций)⁵, технический регламент ТР 186-07 на установку

гидроизоляционных шпонок².

Как было отмечено выше, актуальность исследования металлических гидрошпонок достаточно высока, поэтому для возможности оценки практической эффективности таких конструкций было принято решение выполнить экспериментальное исследование на производственной базе одного из ведущих застройщиков г. Екатеринбурга (ООО «ЛСР. Строительство-Урал»).

Поскольку в технологическом шве бетонных конструкций достаточно часто присутствует вода, весьма вероятно образование на поверхности металлической гидрошпонки коррозии, которая, предположительно, снижает ее гидростатическое сопротивление. Поэтому авторами было принято решение использовать в эксперименте гидрошпонку, изготовленную из оцинкованного металла.

ПОДГОТОВКА К ЭКСПЕРИМЕНТУ

На первом этапе была запроектирована емкостная конструкция из монолитного железобетона (БСТ В20, W6: ГОСТ 7473-2010⁶), квадратная в плане, с двумя технологическими швами по периметру на различной высоте (рис. 4).

В технологические швы экспериментом была запланирована установка оцинкованных листов толщиной 1,5 мм и высотой 200 мм и 400 мм (ОЦ Б-О-1,5x200, ГОСТ 19904-90⁷; Ст3, ГОСТ 14918-80⁸; ОЦ Б-О-1,5x400, ГОСТ 19904-90; Ст3, ГОСТ 14918-80: оцинкованная сталь

³All Types of Waterstops to Prevent Liquid Leaking // [Электронный ресурс]. URL: <https://www.jointwaterstop.com/> (03.12.2022).

⁴Fugenbleche // [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tph-bausysteme.com/> (03.12.2022).

⁵СТО НОСТРОЙ 2.7.156-2014. Конструкции бетонные и железобетонные. Устройство водонепроницаемых конструкций. Правила, контроль выполнения и требования к результатам работ. Стандарт организации. Введ. 11.12.2014. М.: ИПП ООО «Бумажник», 2014. 109 с.

⁶ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия. Введ. 01.01.2012. Кодекс, 2012. 26 с.

⁷ГОСТ 19904-90. Прокат листовой холоднокатаный. Введ. 01.01.91. Кодекс, 1991. 6 с.

⁸ГОСТ 14918-80. Сталь тонколистовая оцинкованная с непрерывных линий. Введ. 01.07.81. М.: Стандарт, 1981.

толщиной 1,5 мм, шириной 200 или 400 мм, нормальной точности прокатки Б, с обрезной кромкой О).

Для наблюдения за гидрошпонками в стенках емкости предусматривались полости

(на сплошных участках гидрошпонки и на участках ее стыков) (рис. 4). Для решения задач эксперимента стыковка листов была предусмотрена в двух вариантах: на силиконовом герметике или на эпоксидном клее.

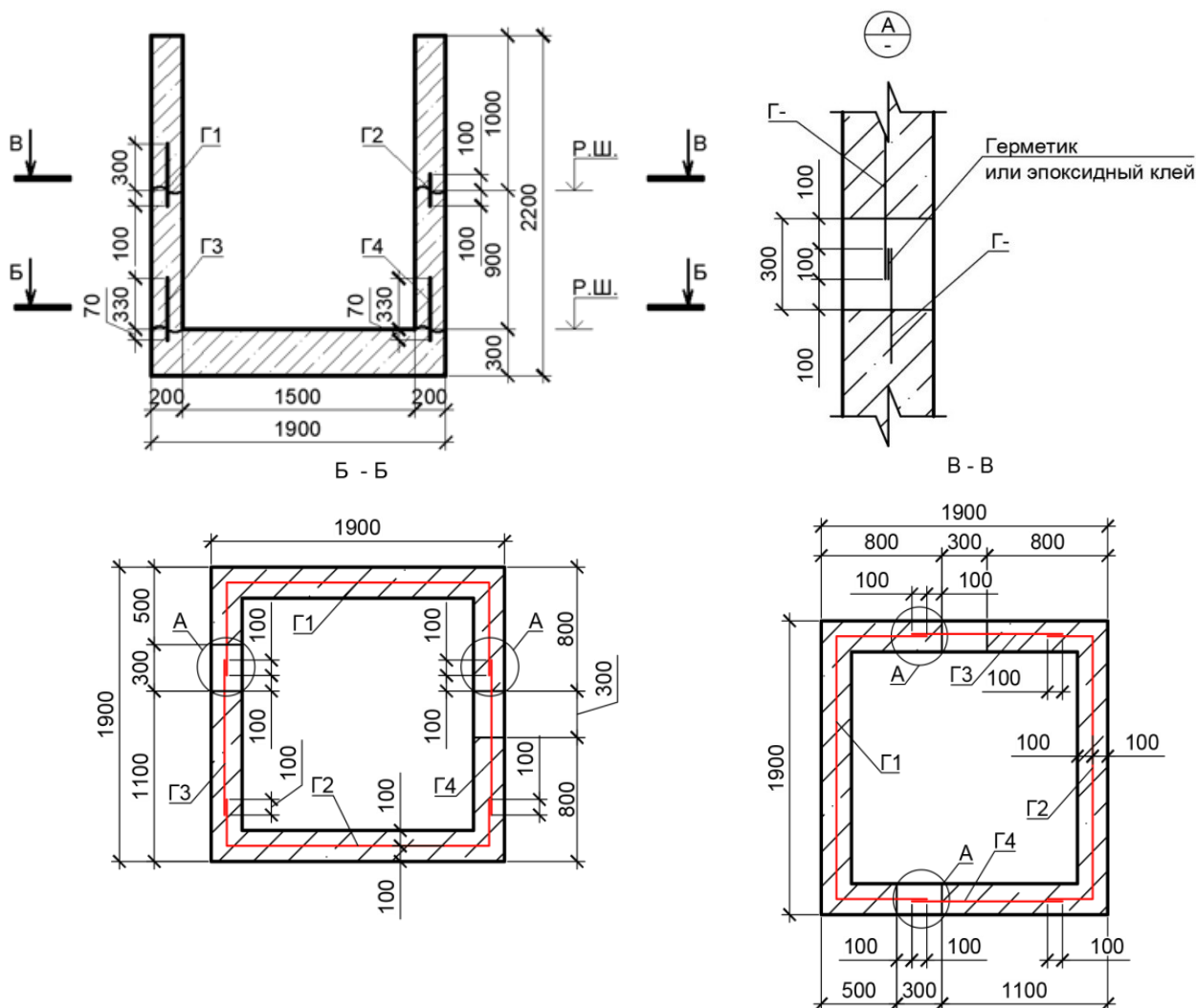


Рис. 4. Геометрия экспериментальной емкости с металлическими гидрошпонками
Fig. 4. Geometry of the experimental tank with metal waterstops



Рис. 5. Образование технологического шва Г3 и Г4 (рис. 4, разрез Б-Б)
Fig. 5. Formation of technological seam G3 and G4 (fig. 4, section Б-Б)

Экспериментальная конструкция возводилась при нормальных условиях внутри производственного цеха (рис. 5 и 6). После изготовления и набора прочности бетона готовая

емкость (рис. 7) была заполнена водопроводной водой на высоту 2 м. Наблюдение за металлическими гидрошпонками происходило в течение 28 сут.



Рис. 6. Образование технологического шва Г1 и Г2 (рис. 4, разрез В-В)
Fig. 6. Formation of technological seam Г1 and Г2 (fig. 4, section B-B)



Рис. 7. Общий вид готовой экспериментальной модели
Fig. 7. View of the finished experimental model

Соединение металлических гидрошпонок по периметру емкости выполнялось внахлест при помощи струбины (рис. 8). Как отмечалось выше, соединение производилось в двух вариантах: на силиконовом герметике (герметик силиконовый ЗУБР «Эксперт» белый,

санитарный, для помещений с повышенной влажностью)⁹ и эпоксидном клее («Момент» супер эпокси)¹⁰. Время выдержки силиконового герметика и эпоксидного клея в струбине перед установкой на арматурный каркас емкости составляло 24 ч. Нахлест стыков

⁹Силиконовый герметик ЗУБР // Zubr-tools.ru [Электронный ресурс]. URL: <http://zubr-tools.ru/prochee-glava/peny-kleya-germetiki-i-pistolety/germetik-silikonovyy-zubr-ekspyert-belyy-sanitarnyy-dlya-pomeshcheniy-s-povyshennoy-vlazhnostyu-280ml> (03.12.2022).

¹⁰Эпоксидный клей Момент. Формула 1 // Moment.ru [Электронный ресурс]. URL: https://www.moment.ru/ru/products/epoksidnyj-klej-moment/moment_super_epoksiformula-1.html (03.12.2022).

металлических гидрошпонок составлял не менее 100 мм. Для обеспечения дополнительной жесткости металлической гидрошпонки использовался фиксирующий элемент, состоящий из арматурных стержней, соединенных между собой ручной электродуговой сваркой (рис. 9). Фиксирующий элемент устанавливался с шагом 300 мм, закреплялся к арматурному каркасу вязальной проволокой (рис. 10 и 11).

Монолитная емкость заполнялась водопроводной водой на высоту 2 м (рис. 12), наблюдение за наполненной емкостью происходило в течение 28 сут.

Давление воды составило:

- на нижний технологический шов ГЗ и Г4 – 20 кПа;
- на верхний технологический шов (Г1 и Г2) – 10 кПа.



Рис. 8. Соединение металлической гидрошпонки при помощи струбцины
Fig. 8. Connecting a metal waterstop with a clamp

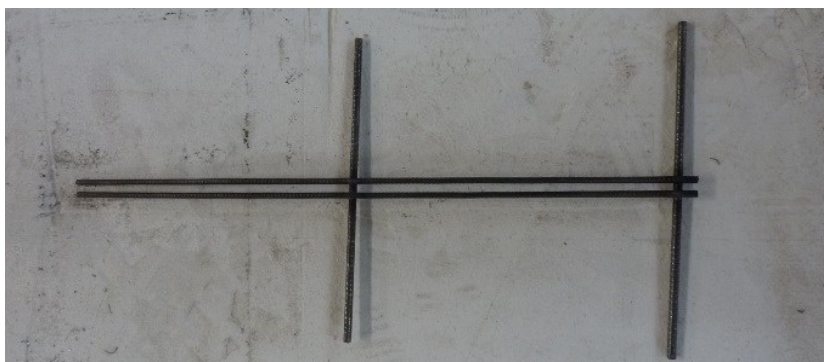


Рис. 9. Фиксирующий элемент
Fig. 9. Fixing element



Рис. 10. Соединение фиксирующего элемента и металлической гидрошпонки
Fig. 10. Connection of the fixing element and the metal waterstop



Рис. 11. Соединение фиксирующего элемента и металлической гидрошпонки
Fig. 11. Connection of the fixing element and the metal waterstop



Рис. 12. Наполнение бетонной емкости водой на высоту 2 м
Fig. 12. Filling a concrete tank with water to a height of 2 m

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Стык металлических гидрошпонок на эпоксидном клее протек в первый день наблюдения при давлении в 20 Кпа и при давлении в 10 кПа (рис. 13) с различной высотой гидрошпонки (200 мм и 400 мм). Стык металлических

гидрошпонок на силиконовом герметике с различной высотой шпонок выдержал оба уровня давления (10 кПа и 20 кПа) и обеспечил герметичность на протяжении всего периода наблюдения (рис. 14). Аналогичная ситуация наблюдалась на сплошных участках гидрошпонки (без устройства стыка) (рис. 15).



Рис. 13. Протечка воды при соединении металлической гидрошпонки на эпоксидном клее
Fig. 13. Water leaks when connecting a metal waterstop with epoxy adhesive



Рис. 14. Герметичный шов при соединении металлической гидрошпонки на силиконовом герметике

Fig. 14. Hermetic seam when connecting a metal waterstop on silicone sealant



Рис. 15. Герметичный шов металлической гидрошпонки без стыка

Fig. 15. Hermetic seam of a metal waterstop without a joint

ВЫВОДЫ

В результате проведенного эксперимента установлено, что применение оцинкованной стали для герметизации рабочих швов бетонирования эффективно при устройстве стыков шпонки по длине при помощи силиконового герметика.

В течение всех 28 сут. наблюдений протечек воды в таких стыках не обнаружено. Из анализа различных исследований не удалось обнаружить сведений о гидростатическом сопротивлении металлических гидрошпонок, а также о практических методиках его достоверного расчета.

В настоящее время при определении гидростатического сопротивления металлических гидрошпонок учитывают только их геометрическую форму (методика, изложенная в СТО НОСТРОЙ 2.7.156-2014 для оценки гидростатического сопротивления шпонок из ПВХ). Влияние эффектов взаимодействий металла и

бетона с образованием химической связи в расчете не учитывается.

Кроме этого, в расчете также не учитываются химические процессы, сопровождающие жизненный цикл конструкции с гидрошпонкой, которые также пока не отражены в нормах по расчету: воздействие агрессивных веществ с металлом, его коррозия, изменение текстуры на внешних поверхностях металлической гидрошпонки.

Резюмируя изложенное выше, существующий расчет гидростатического сопротивления давлению воды гидрошпонки, с учетом ее геометрических параметров по СТО НОСТРОЙ 2.7.156-2014⁵ (рис. 16), следующий:

$$W_r = 4,24 \times W \times \sum R_l,$$

где W_r – водонепроницаемость узла сопряжения, МПа; W – марка бетона по водонепроницаемости (ГОСТ 12730.5-2018¹¹); $\sum R_l$ – величина периметра герметизирующих зон по возможному пути миграции влаги, м.

¹¹ГОСТ 12730.5-2018. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости.

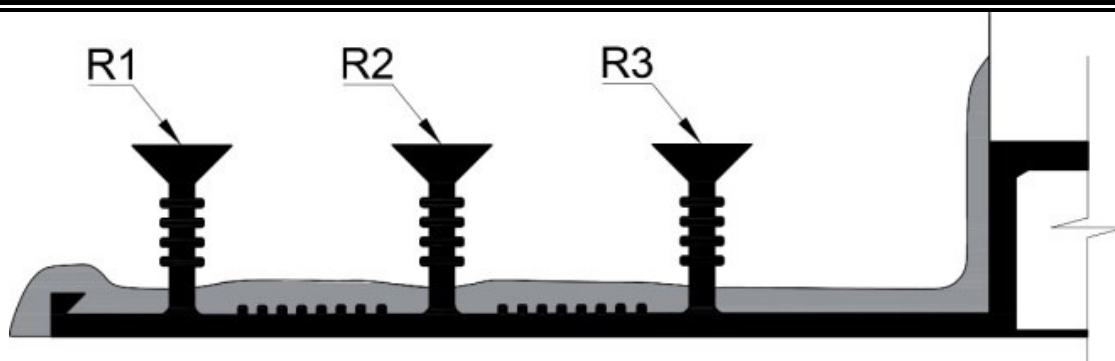


Рис. 16. Схема к расчету гидростатического сопротивления давлению воды гидрошпонки с учетом ее геометрических параметров

Fig. 16. Scheme for calculating the hydrostatic resistance to water pressure of a waterstop, taking into account its geometric parameters

При этом существуют отдельные исследования по оценке взаимодействия металла и бетона.

Отсюда возникает необходимость в объединении разрозненных результатов и проведении комплексного исследования металлических гидрошпонок в теле бетона с одновременным учетом:

- геометрических параметров гидрошпонки (применение листов с различными толщинами и высотами, учет дополнительных выступов и возможных анкерных элементов);

- физико-химического взаимодействия бетона конструкции и металла гидрошпонки (совместная работа бетона и металла, ее изменение со временем, реакция на внешние агрессоры);

Следует также отметить, что в результате проведенного эксперимента были выявлены технологические достоинства и

недостатки металлических гидрошпонок. Среди недостатков отмечена относительно высокая трудоемкость ее монтажа, в частности, стыковка элементов по длине. Среди основных технологических достоинств необходимо отметить собственную жесткость изделия. Дополнительным преимуществом стальных гидрошпонок является их невысокая стоимость.

В заключении необходимо подчеркнуть, что у гидрошпонок ПВХ за последние годы была сформирована хорошая нормативная база, позволяющая проектировщику подбирать различные конфигурации изделий для обеспечения герметизации технологических швов в зависимости от величины гидростатического давления. Для увеличения масштаба применения металлических гидрошпонок, обеспечивающих надежную герметизацию конструкций зданий и сооружений, такую базу предстоит разработать.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Liu S.M., Yu L., Gao J.X., Zhang X.D. Durability of rubber waterstop in extreme environment: effect and mechanisms of ultraviolet aging // *Polymer Bulletin*. 2021. Vol. 78. P. 4019–4032.
2. Byoung Hooi Cho, Boo Hyun Nam, Sangyeon Seo, Jungil Kim, Jinwoo An, Heejung Youn. Waterproofing performance of waterstop with adhesive bonding used at joints of underground concrete structures // *Construction and building materials*. 2019. Vol. 221. P. 491–500. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.103>.
3. Vasilev A.V., Yamov V.I. Resource-saving in the operation of a building with a correctly executed waterproofing // *IV International Conference on Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Yekaterinburg, 4–5 October 2018)*. 2019. Vol. 481. Iss. 1.

- P. 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/481/1/012036>.
4. Шилин А.А., Зайцев М.В., Золотарев И.А., Ляпидевская И.А. Гидроизоляция подземных и заглубленных сооружений при строительстве и ремонте. Тверь: Русская торговая марка, 2003. 396 с.
5. Зарубина Л.П. Гидроизоляция конструкций, зданий и сооружений. СПб: БХВ-Петербург, 2011. 272 с.
6. Асанова Д.Ю. Особенности обследования гидроизоляции зданий и сооружений // *COLLOQUIUM-JOURNAL*. 2019. № 12-3 (36). С. 70–71. EDN: KBUYAB.
7. Gusev R.A., Vasilev A.V., Yamov V.I., Nepryahin A.A. Waterproofing of the foundation slab using the method of the dry dusting // *AIP*

Conference Proceedings (9 March 2023). 2023. Vol. 2701. No. 1. P. 020007.

8. Еремин Д.А., Гилязидинова Н.В. Эффективные способы гидроизоляции фундаментов и подземных сооружений // Проблемы строительного производства и управления недвижимостью. 2018. С. 54–57.

9. Ogura N., Konishi Yu., Sagradyan A., Shiotani T. Monitoring of repaired water leaks using surface wave tomography // *Developments in the Built Environment*. 2023. Vol. 14. P. 100133.

10. Waterproofing material for protection of underground structures, Olga Lyapidevskaya, E3S Web Conf. 2019. Vol. 97 P. 02008 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199702008>.

11. Коянкин А.А., Белецкая В.И., Гужевская А.И. Влияние шва бетонирования на работу конструкции // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 76–81.

12. Барашкова П.С. Гидроизоляция подвалов от грунтовых вод и капиллярной влаги // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 9-1.

13. Тухарели В.Д., Тухарели А.В., Габля А.А. Современные тенденции развития технологий гидроизоляции зданий и сооружений // ИВД. 2017. №3 (46).

14. Сысоев А.К. Долговечность железобетонных и металлических конструкций подземного сооружения // ИВД. 2019. №1 (52).

15. Нойферт Э. Строительное проектирование / Пер. с нем. К.Ш. Фельдмана, Ю.М. Кузьминой; Под ред. З.И. Эстрова и Е.С. Раевой. 2-е изд. М.: Стройиздат, 1991. 392 с. Перевод издания: Neufert E. Bauentwurfslehre. F. Viweg and Sohn Braunschweig/Wiesbaden.

REFERENCES

1. Liu S.M., Yu L., Gao J.X., Zhang X.D. Durability of rubber waterstop in extreme environment: effect and mechanisms of ultraviolet aging. *Polymer Bulletin*. 2021;78:4019-4032.

2. Byoung Hooi Cho, Boo Hyun Nam, Sangyeon Seo, Jungil Kim, Jinwoo An, Heejung Youn. Waterproofing performance of waterstop with adhesive bonding used at joints of underground concrete structures. *Construction and building materials*. 2019;221:491-500. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.103>.

3. Vasilev A.V., Yamov V.I. Resource-saving in the operation of a building with a correctly executed water-proofing. *IV International Conference on Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures* (Yeka-terinburg, 4–5 October 2018). 2019. Vol. 481. Iss. 1. P. 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/481/1/012036>.

4. Shilin A.A., Zaitsev M.V., Zolotarev I.A., Lyapidevskaya I.A. Waterproofing of underground and buried structures during construction and repair. Tver: Russian trademark; 2003. 396 p. (In Russ.).

5. Zarubina L.P. Waterproofing of structures, buildings and structures. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2011. 272 p. (In Russ.).

6. Asanova D.Yu. Features of the examination of waterproofing buildings and structures. *COLLOQUIUM-JOURNAL*. 2019;12-3:70-71. (In Russ.).

7. Gusev R.A., Vasilev A.V., Yamov V.I., Nepryahin A.A. Waterproofing of the foundation slab using the method of the dry dusting. *AIP Conference Proceedings*. 9 March 2023.

2023;2701(1):020007.

8. Eremin D.A., Gilyazidinova N.V. Effective methods of waterproofing foundations and underground structures. *Problems of construction production and real estate management*. 2018. P.54-57.

9. Ogura N., Konishi Yu., Sagradyan A., Shiotani T. Monitoring of repaired water leaks using surface wave tomography. *Developments in the Built Environment*. 2023;14:100133.

10. Lyapidevskaya O. Waterproofing material for protection of underground structures. *E3S Web Conf*. 2019;97:2008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199702008>.

11. Koyankin A.A., Beletskaya V.I., Guzhevskaya A.I. Influence of the concreting seam on the work of the structure. *Vestnik MGSU*. 2014;3:76-81. (In Russ.).

12. Barashkova P.S. Basement waterproofing from groundwater and capillary moisture. *Actual problems of the humanities and natural sciences*. 2016;9-1. (In Russ.).

13. Tukhareli V.D., Tukhareli A.V., Gablia A.A. Modern trends in the development of technologies for hydro-isolation of buildings and structures. *IVD*. 2017;3(46). (In Russ.).

14. Sysoev A.K. Durability of reinforced concrete and metal structures of an underground structure. *IVD*. 2019;1(52). (In Russ.).

15. Neufert E. Structural design.: Per. with him. K.Sh. Feldman, Yu.M. Kuzmina; Ed. Z.I. Estrova and E.S. Raeva. 2nd ed. Moscow: Stroyizdat; 1991. 392 p. (In Russ.). Translation of the edition: Bauentwurfslehre / E. Neufert F. Viweg and Sohn Braunschweig/Wiesbaden.

Информация об авторах

Васильев Александр Владимирович,
ассистент кафедры промышленного,
гражданского строительства и экспертизы
недвижимости,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17, Россия,
e-mail: alexander_vasilev_888@inbox.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5717-8972>

Савватеев Виталий Андреевич,
студент,
Уральский федеральный университет имени
первого президента России Б. Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17, Россия,
e-mail: rabotsavvateev28@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-9100-6077>

Фомин Никита Игоревич,
к.т.н., доцент,
заведующий кафедрой промышленного,
гражданского строительства и экспертизы
недвижимости,
директор Института строительства
и архитектуры,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17, Россия,
e-mail: ni.fomin@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7095-7161>

Антипин Владимир Вячеславович,
главный инженер,
ООО «ЛСР. Строительство-Урал»,
620072, г. Екатеринбург, ул. 40-летия
Комсомола, 34, Россия,
e-mail: antipin.vv@lsrgroup.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.02.2023.
Одобрена после рецензирования 24.02.2023.
Принята к публикации 28.02.2023.

Information about the authors

Alexander V. Vasilev,
Assistant of the Department
of Industrial and Civil Engineering
and Estate Expertise,
Ural Federal University named
after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
17 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia,
e-mail: evgursolo@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5717-8972>

Vitalii A. Savvateev,
Master's,
Ural Federal University named after the First
President of Russia B.N. Yeltsin,
17 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia,
e-mail: rabotsavvateev28@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-9100-6077>

Nikita I. Fomin,
Cand. Sci (Eng.),
Head of the Department of Industrial
and Civil Engineering
and Estate Expertise,
Ural Federal University
named after the First President
of Russia B.N. Yeltsin,
17 Mira St., Ekaterinburg 620002,
Russia,
e-mail: ni.fomin@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7095-7161>

Vladimir V. Antipin,
Chief Engineer,
LLC «LSR-Construction-Ural»,
40th anniversary of Komsomol St., 34
Yekaterinburg 620072, Russia,
e-mail: antipin.vv@lsrgroup.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 01.02.2023.
Approved after reviewing 24.02.2023.
Accepted for publication 28.02.2023.



Исследование эффективности аддитивного инфракрасного отопления промышленных зданий на территориях с пониженными температурами наружного воздуха

О.А. Гребнева^{1✉}, О.Л. Лавыгина², А.В. Алексеев³

^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

^{1,3}Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Обогрев промышленных зданий является сложной и трудоемкой задачей, требующей вложения больших денежных средств. Сложность задачи обуславливается большими габаритами рассматриваемых объектов и повышенными требованиями к их надежности, экономичности и энергоэффективности. Задача еще больше усложняется при ее рассмотрении для регионов России, в которых наблюдается большая продолжительность стояния низких температур. Существенное вложение денежных средств объясняется физическим и моральным износом существующих систем отопления, имеющих огромные тепловые потери. За счет больших размеров рассматриваемых типов объектов недвижимости сложно подобрать оборудование систем отопления, обеспечивающее поддержание требуемых температур внутри здания и удовлетворяющее всем перечисленным выше требованиям. Решением данной проблемы является использование популярных в настоящее время промышленных инфракрасных обогревателей, которые не только позволяют обеспечить равномерный обогрев рассматриваемого здания или помещения, но и значительную экономию энергоресурсов. Использование в качестве основного оборудования для систем отопления инфракрасных обогревателей позволяет организовать зональный (аддитивный) обогрев зданий любого типа и назначения с обеспечением различных температур воздуха даже внутри одного помещения. В данной статье на примере здания складского назначения проведены численные исследования эффективности создания аддитивных систем обогрева с газовыми инфракрасными излучателями (ГИИ). На основе анализа полученных результатов проведено экономическое обоснование предлагаемого технического решения.

Ключевые слова: система отопления, аддитивное отопление, инфракрасное отопление, инфракрасные обогреватели, регионы с пониженной температурой, энергоэффективные технологии

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания программы фундаментальных научных исследований в РФ на 2021–2030 гг. (№ FWEU-2021-0002, AAAA-A21-121012090012-1).

Для цитирования: Гребнева О.А., Лавыгина О.Л., Алексеев А.В. Исследование эффективности аддитивного инфракрасного отопления промышленных зданий на территориях с пониженными температурами воздуха // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 239–251. <https://elibrary.ru/cbfbkw>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-239-251>.

Original article

Study into the efficiency of additive infrared heating of industrial buildings in areas with low outside temperatures

Oksana A. Grebneva^{1✉}, Olga L. Lavygina², Aleksandr V. Alekseev³

^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^{1,3}Energy Systems Institute SB RA, Irkutsk, Russia

Abstract. Heating of industrial buildings is a complex and labor-consuming task requiring major financial investments. The complexity of this task grows in the case of large-size construction objects and strict requirements to their reliability, economic performance, and energy efficiency. The problem is

© Гребнева О.А., Лавыгина О.Л., Алексеев А.В., 2023

even more complicated in those Russian regions, where low temperatures remain for a longer period of time. Significant financial investments are caused by the wear and obsolescence of the existing heating systems, leading to enormous heat losses. Due to the large size of the considered property types, it is difficult to select heating equipment that could provide the required temperatures inside the building while meeting all the aforementioned requirements. The solution can be found in the currently popular industrial infrared heaters, which provide both uniform heating of the building or room in question under significant energy savings. The application of infrared heaters as the main heating system equipment makes it possible to organize zonal (additive) heating of buildings of any type and purpose allowing different air temperatures even inside a single room. In this paper, a numerical study of the efficiency of additive heating systems with gas infrared emitters was carried out using a warehouse building as an example. Based on the analysis of the obtained results, the economic justification of the proposed technical solution was provided.

Keywords: heating systems, additive heating, infrared heating, infrared heaters, low temperature regions, energy saving and efficient technologies

Funding: The research was carried out within the framework of the state task (No. FWEU-2021-0002, Reg. No. AAAA21-121012090012-1) The Program of Fundamental Scientific Research in the Russian Federation for the long-term period (2021-2030).

For citation: Grebneva O.A., Lavygina O.L., Alekseev A.V. Study into the efficiency of additive infrared heating of industrial buildings in areas with low outside temperatures. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(2):239-251. (In Russ.). <https://elibrary.ru/cbfkbw>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-239-251>.

ВВЕДЕНИЕ

Системы отопления промышленных объектов недвижимости должны обеспечивать благоприятные условия (температура внутреннего воздуха, влажность, воздухообмен, состав загрязнений и т.д.) как для нахождения обслуживающего персонала в рассматриваемом помещении (в рабочей зоне), так и для проходящих в них технологических и производственных процессов. В зависимости от типа и назначения производственных зданий зависит состав параметров и требований к микроклимату, устанавливаемые нормативными документами и стандартами¹. В работах [1] доказано благоприятное воздействие инфракрасного лучистого отопления на самочувствие людей.

В соответствии со ст. 11 «Обеспечение энергетической эффективности зданий, строений, сооружений» Федерального закона², од-

ной из первоочередных задач является использование при проектировании, эксплуатации и реконструкции систем жизнеобеспечения объектов недвижимости (в том числе и зданий промышленного назначения) современных технологий, обеспечивающих экономию и эффективность использования энергетических ресурсов, т.е. обеспечение их энергоэффективности^{2,3} [2, 3] и отвечающих экологическим требованиям [4–6]. В современных условиях существующие системы обеспечения тепловой энергией зданий имеют значительный моральный и физический износ, и, как следствие, большие теплопотери. Поэтому эти системы требуют больших вложений при их эксплуатации, а также проведение профилактических и ремонтных мероприятий⁴ [7, 8]. Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что вопрос создания энергоэффективных систем

¹СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Допустимые величины параметров микроклимата на рабочих местах в помещениях // Kodeks.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (01.02.2023).

²Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федер. закон от 23.11.2009 N 261-ФЗ (ред. от 14.07.2022) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2023) // [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/12171109/> (01.02.2023).

³Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации за 2019 г. // Министерство экономического развития РФ [Электронный ресурс]. URL: https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_energoberezheniya_i_povyshenii_energeticheskoy_effektivnosti_v_rossiyskoy_federacii_za_2019_god.html (01.02.2023).

⁴Об утверждении муниципальной программы «Развитие инженерной инфраструктуры. Повышение энергоэффективности»: постановление от 21 января 2020 № 031-06-23/0 // Kodeks.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/561713195> (01.02.2023).

обогрева зданий (особенно промышленного назначения) становится наиболее острым.

Одним из вариантов экономии энергетических ресурсов, а также увеличения энергетической эффективности систем отопления зданий промышленного назначения в целом является внедрение и использование систем аддитивного инфракрасного (или радиационного) отопления на основе газовых инфракрасных обогревателей [9]. Особенно это актуально для объектов недвижимости, расположенных в регионах, где наблюдается продолжительное стояние низких (отрицательных) температур.

Стоит отметить, что трудности в обеспечении промышленных объектов недвижимости возникают в следствие:

1) больших размеров зданий. Площадь помещений может достигать до десятков тысяч квадратных метров. Высота помещений промышленных объектов может достигать десятки метров. Эти факторы способствуют увеличению затрат на обогрев, так как, например, из-за необходимости поддержания повышенной температуры в рабочей зоне обслуживающего персонала требуется нагревать весь объем помещений. Для поддержания различных температур в пределах одного помещения приходится поддерживать наибольшую из них;

2) повышенных требований:

- надежности. Это требование связано с необходимостью непрерывности протекающих технологических и производственных процессов;
- энергетической эффективности как к объ-

ектам промышленной инфраструктуры.

- экономической эффективности. Уменьшение затрат на собственные нужды промышленных объектов, которые могут повлечь удорожание результатов деятельности объекта.

Исследованиям использования инфракрасного излучения для отопления зданий и его эффективности посвящены многочисленные работы [9–18]. Предметом данной статьи является исследование возможности и эффективности использования аддитивного инфракрасного обогрева промышленных зданий с газовыми промышленными инфракрасными обогревателями.

СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Принцип работы инфракрасного отопления зданий и его сравнение с традиционным (конвективным) отоплением проиллюстрирован на рис. 1. Принцип работы инфракрасного отопления заключается в нагреве поверхности излучением, при этом нагревается поверхность, на которую они направлены, в результате чего происходит теплообмен и нагревается воздух. Преимуществом инфракрасного отопления над традиционным является нагрев требуемой поверхности, при этом максимальная температура воздуха достигается в зоне этой поверхности. При использовании традиционной системы отопления значение максимальных температур (за счет конвективного теплообмена) достигается вне рассматриваемой зоны.

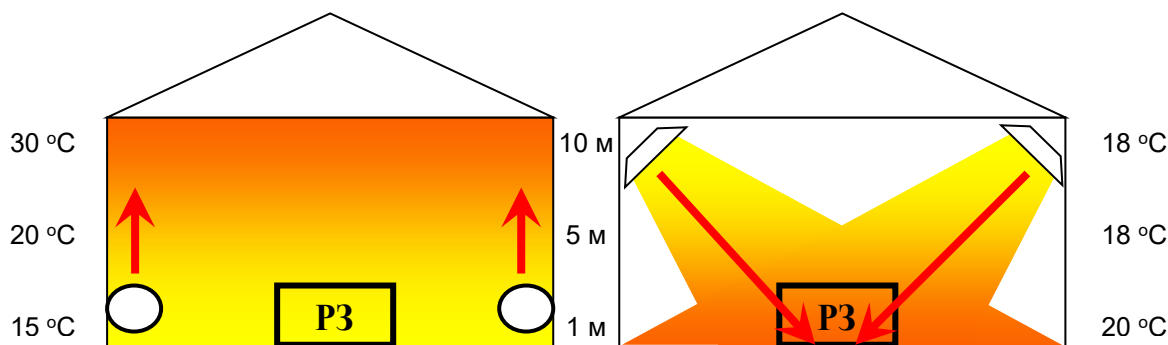


Рис. 1. Сравнение принципа работы систем традиционного (водяного) и инфракрасного обогрева здания:

P3 – рабочая зона, → – направление распространения температурного фронта

Fig. 1. Comparison of the principle of operation of a traditional (water) and infrared building heating system:

WZ – work zone, → – direct of temperature front

На рис. 1 показано, как излучаемая инфракрасными излучателями энергия сосредотачивается и накапливается в приповерхностных слоях. Нагретая ограждающая конструкция посредством конвекции обеспечивает нагрев

непосредственно воздуха рабочей зоны. Таким образом, при использовании обогрева зданий с помощью ГИИ (рис. 2) средняя температура поверхностей ограждающих поверхностей (стен ($t_{ст}$) и пола (t_n)) выше температуры воз-

духа непосредственно в рабочей зоне ($t_{вр}$). При этом в свободном от инфракрасных лучей объеме помещения (на рисунке эта зона находится выше уровня установки ГИИ) температура ($t_{в}$) ниже чем температура $t_{вр}$ (согласно

СанПиН 1.2.3685-21¹ в рабочей зоне помещений промышленного назначения допускается снижение величины $t_{вр}$ по сравнению с предусмотренными до 4°C [19].

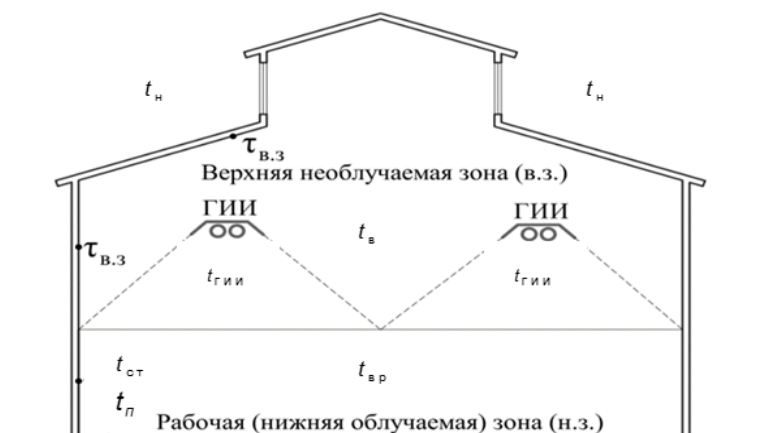


Рис. 2. Иллюстрация обогрева здания газовыми инфракрасными обогревателями
 Fig. 2. Illustration of heating a building with gas infrared heaters

Моделирование происходящего теплообмена при применении аддитивного отопления промышленных зданий является сложной задачей. Вопросам исследования математических зависимостей, используемых для описания и моделирования физических процессов, происходящих при обогреве зданий инфракрасными излучателями с учетом конвективной составляющей посвящена работа [20]. В дан-

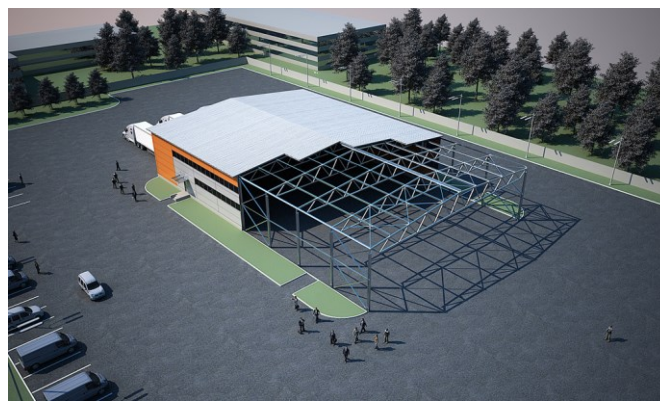
ной работе они используются в качестве исходной модели.

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта для исследования аддитивного инфракрасного отопления выбрано здание, выполняющее функцию складского помещения, общий вид которого приведен на рис. 3. В качестве места расположения выбран г. Иркутск.



a



b

Рис. 3. Общий вид (a) и разрез (b) выбранного здания
 Fig. 3. General view (a) and section (b) of the selected building

Природно-климатическая характеристика района объекта исследования. Климатологические характеристики района распо-

ложения здания приняты в соответствии с существующими строительными нормами и правилами⁵. Район расположения объекта отно-

⁵СП 131.13330.2020 Строительная климатология. Введ. 25.06.2021 // Kodeks.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358> (21.10.22);
 СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Введ. 04.06.2017 // Kodeks.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (21.10.22).

сится к 1 климатическому району, подрайон 1В. Основные параметры климата г. Иркутска, не-

обходимые и используемые при проектировании систем отопления, сведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика климатических условий района эксплуатации здания складского назначения

Table 1. Climate characteristics for heating systems design

Параметр	Ед. изм.	Значение
Среднегодовая температура воздуха	°C	0,5
Средняя температура наиболее холодной пятидневки (обеспеченностью 0,92)	°C	-33
Средняя температура наиболее холодных суток	°C	-37
Среднемесячная относительная влажность воздуха наиболее холодного месяца	%	81
Температура воздуха наиболее жаркого месяца года (июля)	°C	17,6
Продолжительность отопительного сезона	сут	232
Средняя температура отопительного сезона	°C	-7,7
Нормативный скоростной напор ветра (для III района)	кПа	0,38
Нормативный вес снегового покрова (для II района)	кПа	1,2
Нормативная глубина сезонного промерзания	м	2,8

Характеристика объекта исследования. Характеристика складского помещения:

- 1) холодный/теплый склад 48 x 30 площадью 1 468 м²;
- 2) высота от пола до нижней точки несущих ферм – 5–7 м;
- 3) максимальная высота – 10 м.

Проектирование аддитивной системы обогрева здания с газовыми инфракрасными излучателями. Выберем схему размещения объектов инфракрасного отопления внутри выбранного складского помещения, исходя из двух вариантов обогрева:

- 1) с обеспечением единой температуры

внутреннего воздуха из условия постоянного нахождения внутри помещения обслуживающего персонала (рис. 4, а). Созданные при этом температурные поля внутри помещения приведены на рис. 4, б. При таком обогреве промышленного здания будет наблюдаться перерасход средств, который можно сэкономить (как будет показано при экономическом обосновании) за счет организации второго типа отопления;

- 2) аддитивного инфракрасного отопления (рис. 5, а). Созданные при этом температурные поля внутри помещения приведены на рис. 5, б.

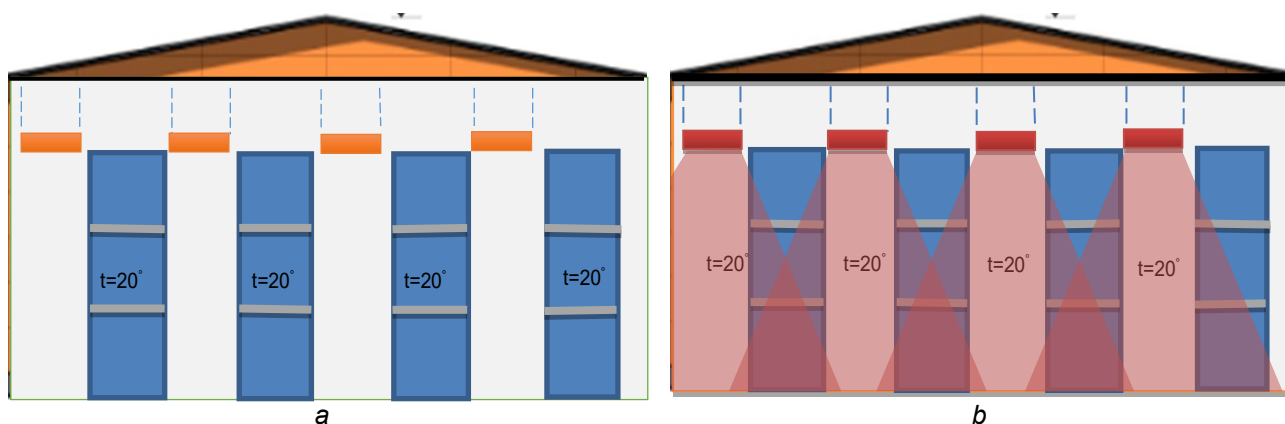


Рис. 4. Инфракрасное отопление складского помещения с обеспечением единой температуры внутреннего воздуха (а) и создаваемые при этом тепловые поля (б)

Fig. 4. Infrared heating of a warehouse with a uniform internal air temperature (а) and created thermal fields (b)

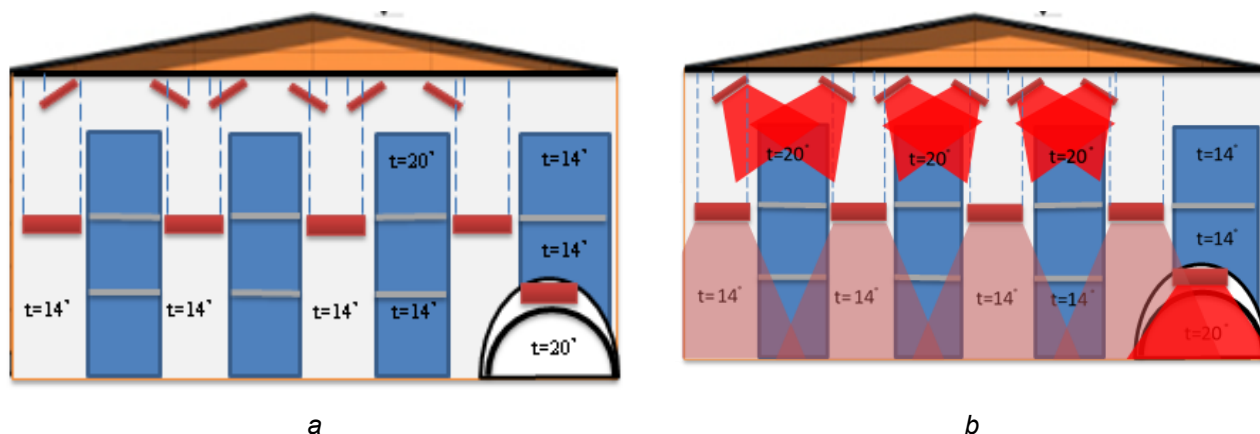


Рис. 5. Инфракрасное отопление складского помещения с обеспечением аддитивной температуры внутреннего воздуха (а) и создаваемые при этом тепловые поля (b)
Fig. 5. Infrared heating of a warehouse with the provision of an additive temperature of the internal air (a) and the created thermal fields (b)

Как видно на рис. 5, а и б, при аддитивном отоплении в складском помещении создаются зоны с разными температурами внутреннего воздуха: верхняя зона – для хранения товаров с требованием повышенной температуры внутреннего воздуха (20°C); оставшаяся зона – для остальных типов товаров (14°C). Однако для зоны постоянного нахождения обслуживающего персонала требуется создание еще одной зоны с температурой 20°C . Для этого предлагается использовать специальную каркасную конструкцию куполообразной формы, покрытием для которой может служить либо стекло, либо менее дорогостоящие полимерные материалы (рис. 6).

Конструкция может иметь различные формы: сферический купол, прямоугольная форма, полностью закрытые, полуоткрытые и т.д. Дан-

ную конструкцию предлагается установить в складском помещении, как показано на рис. 7.

Установка данной конструкции позволяет существенно уменьшить конвективную составляющую при создании инфракрасного отопления, тем самым эффективно поддерживать требуемую локальную температуру. Подбор оборудования для создания аддитивного инфракрасного отопления. На примере объекта исследования, технические характеристики которого приведены выше, в статье проводились численные исследования эффективности применения аддитивного инфракрасного отопления и анализ полученных результатов в сравнении с инфракрасным (с обеспечением единой температуры во всем объеме рассматриваемого помещения) и традиционным водяным отоплением.

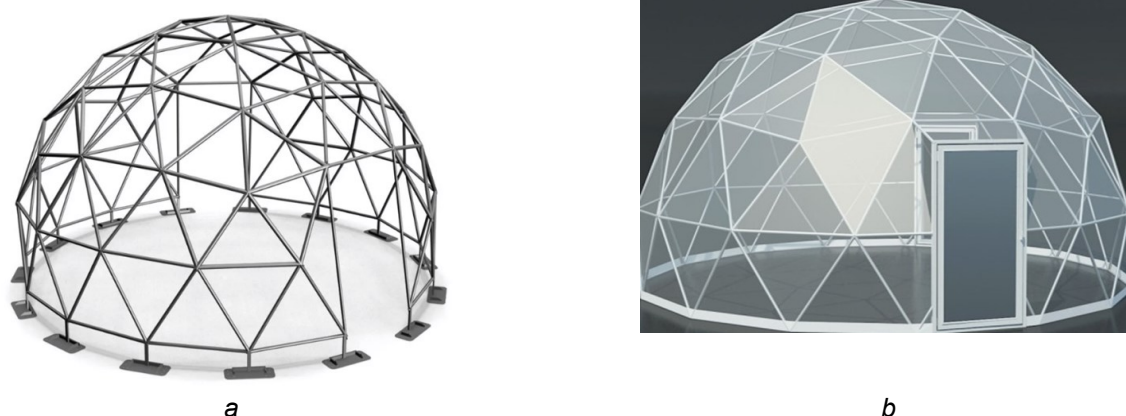


Рис. 6. Каркасно-металлический купол для создания зоны постоянного нахождения обслуживающего персонала (а) и один из вариантов его покрытия (b)
Fig. 6. Frame-metal dome to create a zone of permanent residence of service personnel (a) and one of the options for its coverage (b)

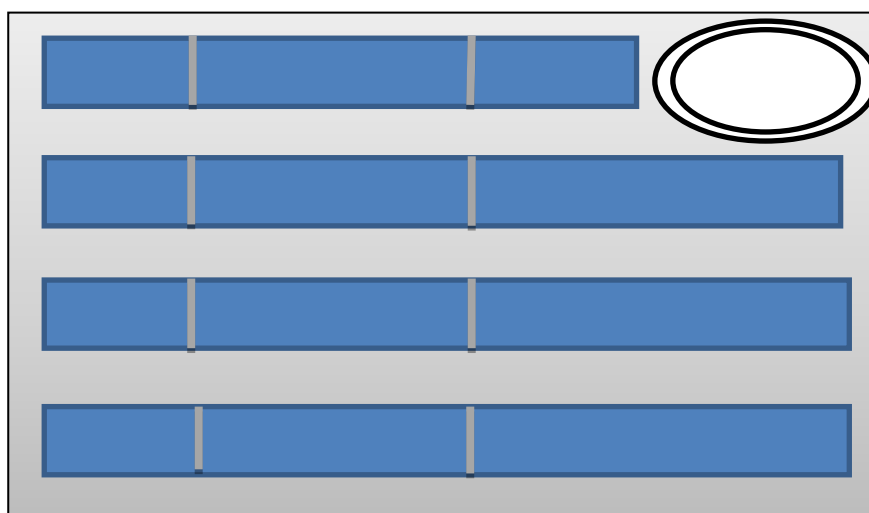


Рис. 7. Схема расположения конструкции для постоянного нахождения людей (вид сверху)
Fig. 7. The layout of the structure for the permanent presence of people (top view)

Теплопотери здания определялись на основе теплотехнического расчета его ограждающих конструкций двух вариантов:

1) при условии полного обогрева помещения. В результате расчета величина тепловых потерь составила

$$Q = 104038.2 \text{ Вт} \approx 0.104 \text{ МВт} \approx 0.121 \text{ Гкал/ч};$$

2) при условии зонального обогрева. В результате расчета величина тепловых потерь составила

$$Q = 83230.6 \text{ Вт} \approx 0.083 \text{ МВт} \approx 0.097 \text{ Гкал/ч}.$$

В качестве приборов отопления приняты газовые инфракрасные излучатели ГИИ-10⁶ (ООО «РегнумГаз», г. Екатеринбург).

Монтаж приборов обогрева – потолочный, настенный. Высота размещения газовых инфракрасных излучателей – 7 м.

Выбор типа оборудования и его количества проводится на основе расчета установленной мощности также для двух вариантов на основе зависимостей, приведенных в работах [5, 9].

В результате расчета установленная мощность газовых инфракрасных обогревателей составила:

1) при условии полного обогрева помещения – $W = 88.12 \text{ кВт}$;

2) при условии зонального обогрева – $W = 70.5 \text{ кВт}$.

В соответствии с полученной величиной W для обогрева промышленного помещения выполнен подбор оборудования, состав ко-

торого представлен в табл. 2.

Таблица 2. Технические характеристики газовых инфракрасных излучателей ГИИ-10

Table 2. Technical characteristics of gas infrared emitters ГИИ-10

Параметр	Значение
Тепловая мощность ГИИ, кВт	10
Тип монтажа	Потолочный, настенный
Количество:	
– вариант 1;	9
– вариант 2	7
Расход газа при номинальной тепловой мощности:	
– для природного газа, м ³ /ч;	1,0
– для сжиженного газа, кг/ч	0,78

Экономическое обоснование использования аддитивного инфракрасного отопления.

Ниже приводится расчет технико-экономических показателей при создании трех типов отопления:

1) инфракрасного отопления с обеспечением единого температурного поля;

2) аддитивного инфракрасного отопления с обеспечением зонального распределения температуры внутреннего воздуха;

3) традиционного водяного отопления.

Инфракрасное отопление с ГИИ. Затраты

⁶Газовый инфракрасный излучатель ГИИ-10 (серия 2100) // Regnumgaz96.ru [Электронный ресурс]. URL: https://www.regnumgaz96.ru/products/101784115-gazovy_infrakrasny_izluchatel_gii_10_seriya_2100 (01.02.2023).

на эксплуатацию системы отопления с ГИИ в течение года можно определить как

$$Z_r^{\text{год}} = B_r \cdot C_r; \quad (1)$$

$$B_r = 24 \cdot n \cdot b_r \cdot N \cdot k_i, \quad (2)$$

где B_r – годовой расхода газа, м^3 ; C_r – стоимость 1 кг м^3 газа (принимается согласно⁷, $C_r = 2.75$ руб/кг); 24 – коэффициент для перевода размерности; n – количество излучателей; b_r – расход газа одного излучателя в час (согласно табл. 2 для ГИИ-10: природный газ – $1,0 \text{ м}^3/\text{ч}$; сжиженный газ – $0,429 \text{ кг/ч}$). Для расчета годового расхода топлива выбираем в качестве сырья природный газ с $b_r = 1,0 \text{ м}^3/\text{ч}$; N – продолжительность отопительного периода, сут; k_i – коэффициент использования отопительной системы: для производственного здания с автоматическим контролем температуры воздуха принимается равным 0,5. Учитывая (5), эксплуатационные затраты на обогрев здания ГИИ составят 68 904,00 руб/год.

Аддитивное инфракрасное отопление с ГИИ. Затраты на эксплуатацию системы отопления с ГИИ в течение года рассчитываются аналогично пункту 1 с использованием

формул (1)–(2). Годовые эксплуатационные затраты на обогрев здания ГИИ составят 53 592,00 руб/год.

Традиционное водяное отопление. Затраты на традиционную водяную систему отопления здания принимаются с учетом тарифа на тепловую энергию на территории, где расположено здание. Для простоты расчета принимаем тариф на тепловую энергию по тарифу для населения (для г. Иркутска – 1 733,30 руб/Гкал (с 01.12.2022 по 31.12.2023⁸)).

Таким образом, годовые затраты на производство тепловой энергии для водяной системы отопления составят

$$Z_r^{\text{год}} = 0.121 \cdot 24 \cdot 233 \cdot 1730.30 = 1170776.35 \text{ руб.}$$

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты расчета годовых затрат на энергоресурсы, используемые оборудованием для обогрева выбранного здания, приведены в табл. 3 и на рис. 8 и 9.

Экономический эффект от создания аддитивного инфракрасного отопления по сравнению с традиционным водяным отоплением составляет $(1170776,35 - 53592,00) / 1170776,35 \cdot 100 = 95,4\%$.

Таблица 3. Результаты расчета затрат по разным типам систем отопления здания
Table 3. Results of energy costs

Параметр	Инфракрасное	Аддитивное инфракрасное	Водяное
Годовые затраты, руб.	68 904,00	53 592,00	1 170 776,35

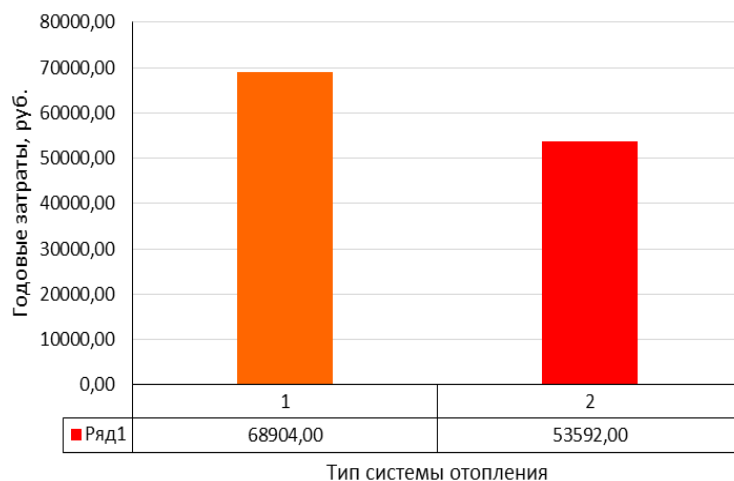


Рис. 8. Результаты расчета затрат для систем отопления разного типа:

1 – инфракрасное; 2 – аддитивное инфракрасное

Fig. 8. Calculation results of different types heating systems:

1 – infrared heating system; 2 – additive infrared heating system

⁷Карта тарифов на природный газ с 1 января 2020 года // Энерго-24. [Электронный ресурс]. URL: <https://energo-24.ru/tariffs/gaz/gaz2020/13389.html> (01.02.2023).

⁸О внесении изменений в отдельные приказы службы по тарифам по Иркутской области: приказ от 29 ноября 11.2022 N 76-670-спр. Служба по тарифам Иркутской области // Kodeks.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/406408346> (01.02.23).

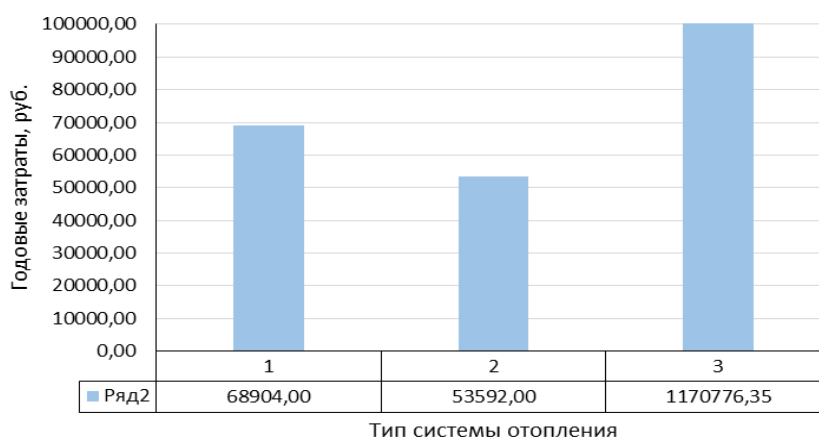


Рис. 9. Результаты расчета для систем отопления разного типа:

1 – инфракрасное; 2 – аддитивное инфракрасное; 3 – традиционное водяное

Fig. 9. Calculation results for heating systems different types:

1 – infrared heating system with gas infrared emitters; 2 – additive infrared heating system with gas infrared emitters; 3 – traditional water heating system

Экономический эффект от создания аддитивного инфракрасного отопления по сравнению с инфракрасным отоплением составляет $(68904,00 - 53592,00) / 68904,00 \cdot 100 = 22,2\%$.

Из рис. 11 видно, что затраты на эксплуатацию традиционных водяных систем отопления выше, чем для систем отопления с инфракрасными излучателями, а создание аддитивного отопления (см. рис. 10) позволяет еще более снизить годовые затраты.

Для анализа экономической эффективности использования аддитивного инфракрасного отопления с использованием газовых инфракрасных излучателей рассчитаем срок окупаемости после проведения мероприятий по реконструкции системы отопления с заменой основного оборудования на ГИИ: $T = K/P$, где K – капитальные вложения; P – ожидаемая прибыль.

Анализ рынка оборудования для организации инфракрасного обогрева зданий показал, что средняя стоимость газового инфракрасного излучателя ГИИ-10 составляет 77 200 руб¹. В данной работе для здания складского назначения требуется установка 9 и 7 таких обогревателей (в соответствии с вариантом обогрева здания).

Суммарные затраты на основное оборудование составят

1) при условии полного обогрева помещения – 694 800 руб.;

2) при условии зонального обогрева – 540 400 руб.

Кроме этого, необходимо учитывать затраты на монтаж оборудования, которые в среднем не превышают 30% от стоимости монтиру-

емого оборудования. Затраты на монтаж составят

1) при условии полного обогрева помещения – 208 440 руб.;

2) при условии зонального обогрева – 162 120 руб.

Капитальные вложения на систему отопления с ГИИ составят:

1) при условии полного обогрева помещения – $K = 903240,00$ руб./год;

2) при условии зонального обогрева – $K = 702520,00$ руб./год.

Ожидаемая прибыль от внедрения технического решения по организации аддитивного обогрева здания по сравнению с традиционной системой отопления составит

$$P = Z_i^* - Z_i^* = (117077,35 - 53592,00) = 1117184,35 \text{ руб. /год.}$$

Таким образом, срок окупаемости $T = 702520,00 / 1117184,35 = 0,63$ года ≈ 8 мес.

При создании инфракрасного отопления при условии полного обогрева помещения:

– ожидаемая прибыль составит $P = Z_i^* - Z_i^* = (117077,35 - 68904,00) = 1101872,35$ руб. /год;

– срок окупаемости составит $T = 903240,00 / 1101872,35 = 0,82$ года ≈ 10 мес.

ВЫВОДЫ

Обогрев производственных помещений, как было сказано ранее, является сложной задачей. Одним из способов преодоления трудностей, возникающих при ее решении, является использование инфракрасного отопления. Современные условия эксплуатации производственных помещений диктуют требования к созданию аддитивного (послойного) температурного фона для обеспечения возможности

создания зон с различными температурами внутреннего воздуха.

Численные исследования, проведенные в статье, подтвердили, что при использовании инфракрасного обогрева зданий существенно сокращается расход тепла по сравнению с водяным отоплением. А создание аддитивного инфракрасного отопления еще в большей степени усиливает этот эффект.

Как следствие, сокращение расхода тепла уменьшает затраты на систему отопления здания в целом. Еще большую степень экономии затрат можно достичь за счет выбора оптимального типа инфракрасного обогревателя для конкретного типа производственного помещения, исходя из условий его эксплуатации. При этом не следует забывать, что выбор типа

излучателя должен производиться с учетом требований к условиям их использования и эксплуатации.

Годовые затраты для обогрева здания при внедрении аддитивной системы отопления существенно сокращаются (на $\approx 90\%$, за счет зонного обогрева рабочих зон промышленного помещения) по сравнению с повсеместно используемыми традиционными водяными системами отопления.

Однако степень данного эффекта может быть различна для разных регионов вследствие различия тарифов на энергоресурсы. Этот факт требует обязательного учета при выборе типа системы отопления. Срок окупаемости для рассмотренных условий составил чуть меньше года.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шелехов И.Ю., Пожидаев В.В. Аддитивные инфракрасные системы обогрева // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. Т. 10. № 1. С. 124–129. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-1-124-129>. EDN: RAKSYU.
2. Grebneva O., Lavygina O. Study of ecological and economic efficiency for resource supplying organizations in the transition to alternative sources // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 751. No. 1. P. 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/751/1/012007>.
3. Хан В.В., Деканова Н.П., Романова Т.А., Шареева С.А. Комплексный анализ эффективности энергосберегающих мероприятий для объектов социальной сферы Восточной Сибири на основе системного подхода // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2017. Т. 7. № 1. С. 84–93. EDN: YHGXFT.
4. Grebneva O., Lavygina O. Study of the possibility for reducing of environmental damage when the transition to alternative sources of heat supply systems in housing and communal services // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 880. No. 1. P. 012043.
5. Лавыгина О.Л., Гребнева О.А., Коробенкова О.В., Смоляр А.В. Оценка предотвращенного экологического ущерба при внедрении инновационных технологий в системах жилищно-коммунального хозяйства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. Т. 10. № 2. С. 234–241. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-2-234-241>. EDN: JRHHSF.
6. Lavygina O., Grebneva O. Study of changes in emissions into the atmosphere with the reconstruction of heat supply systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 880. No. 1. P. 012048.
7. Khan V.V., Dekanova N.P., Khan P.V. Actual problems of the operation of apartment buildings // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 880. P. 012044. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/880/1/012044>.
8. Khan V.V., Dekanova N.P., Khan P.V. Assessment of the energy performance of buildings // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 880. P. 012045. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/880/1/012045>.
9. Гребнева О.А., Широких А.Э., Макеева К.И. Эффективность инфракрасного обогрева производственных помещений в условиях Сибири // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. Т. 10. № 4. С. 552–559. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-4-552-559>. EDN: DJODXP.
10. Yurkevich Yu., Spodyniuk N. Energy-saving infrared heating systems in industrial premises // Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym. 2015. Vol. 2. No. 16. P. 140–144.
11. Chao Chen. Case Studies: Infrared Heating in Industrial Applications // ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry. 2007. P. 6–28.
12. Aboud S.A., Altemimi A.B., Al-Hilphy A.R.S., Lee Yi-Chen, Cacciola F. A comprehensive review on infrared heating applications in food processing // Molecules. 2019. Vol. 24. No. 22. P. 4125. <https://doi.org/10.3390/molecules24224125>.
13. Aleksander Klepaczka. Possibilities of using infrared heaters in production of corrugated paperboard and packaging products // 2002.
14. Brown K.J., Farrelly R., O'Shaughnessy S.M., Robinson A.J. Energy efficiency of electrical infrared heating elements // Applied Energy. 2016. Vol. 162. P. 581–588. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.064>.

15. Butturini R., Ngo M. Flux mapping of radiant electric heaters. Maryland: U.S. Consumer Product Safety Commission, 2005. 20 p.

16. Schmidt F.M., Le Maout Ya., Monteix S. Modeling of infrared heating of thermoplastic sheet used in thermoforming process // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 143–144. P. 225–231.

17. Куриленко Н.И., Максимов В.И., Мамонтов Г.Я., Нагорнова Т.А. Тепловой режим производственных помещений с системами отопления на базе газовых инфракрасных излучателей. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 101 с.

18. Шелехов И.Ю., Шишелова Т.И., Иноземцев В.П., Пожидаев В.В. Эффективная конструкция нагревательного элемента для инфракрасного обогрева // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2016. № 3 (18). С. 118–124. EDN: WMNFBF.

19. Бодров В.И., Смыков А.А. Температурный режим помещений с системами лучистого отопления // Конгресс «Устойчивое развитие регионов в бассейнах великих рек. приоритеты в условиях глобальных изменений», в рамках 17-го Междунар. науч.-промышленного форума «Великие реки –2015» (г. Нижний Новгород, 19–22 мая 2015 г.). Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2015. С. 76–80. EDN: VCGDBV.

20. Бодров В.И., Смыков А.А. Методика тепло-технического расчета наружных ограждающих конструкций зданий, отапливаемых инфракрасными излучателями // *Сантехника, отопление, кондиционирование*. 2017. № 1 (181). С. 92–95. EDN: ZEOVBV.

REFERENCES

1. Shelekhov I.Yu., Pozhidaev V.V. Additive infrared heating systems. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2020;10(1):124-129. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-1-124-129>. EDN: RAKSY.

2. Grebneva O., Lavygina O. Study of ecological and economic efficiency for resource supplying organizations in the transition to alternative sources. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;751(1):012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/751/1/012007>.

3. Khan V.V., Dekanova N.P., Romanova T.A., Sharaeva S.A. Complex analyses of efficiency of energy effectiveness measures for the objects of social sphere in the Eastern Siberia on the basis of system approach. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investments. Construction. Real estate*. 2017;7(1):84-93. (In Russ.). EDN: YHQXFT.

4. Grebneva O., Lavygina, O. Study of the possibility for reducing of environmental damage when the transition to alternative sources of heat supply systems in housing and communal services. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;880(1):012043.

5. Lavygina O.L., Grebneva O.A., Korabenkova O.N., Smolyar A.V. An assessment of prevented ecological deprivation during the implementation of innovative technologies in the systems of housing and utility infrastructure. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2020;10(2):234-241. (In Russ.). EDN: JRHHSP. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-2-234-241>.

6. Lavygina O., Grebneva O. Study of changes in emissions into the atmosphere with the reconstruction of heat supply systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;880(1):012048.

7. Khan V.V., Dekanova N.P., Khan P.V. Actual problems of the operation of apartment buildings. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;880:012044. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/880/1/012044>.

8. Khan V.V., Dekanova N.P., Khan P.V. Assessment of the energy performance of buildings. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;880:012045. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/880/1/012045>.

9. Grebneva O.A., Shirokih A.E., Makeeva K.I. Efficiency of infrared heating of industrial premises under Siberian conditions. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2020;10(4):552-559. (In Russ.). EDN: DJODXP. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-4-552-559>.

10. Yurkevich Yu., Spodynuk N. Energy-saving infrared heating systems in industrial premises. *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*. 2015;2(16):140-144.

11. Chao Chen. Case Studies: Infrared Heating in Industrial Applications. *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry*. 2007:6-28.

12. Aboud S.A., Altemimi A.B., Al-Hilphy A.R.S., Lee Yi-Chen, Cacciola F. A comprehensive review on infrared heating applications in food processing. *Molecules*. 2019;24(22):4125. <https://doi.org/10.3390/molecules24224125>.

13. Aleksander Klepaczka. Possibilities of using infrared heaters in production of corrugated paper-board and packaging products // 2002.

14. Brown K.J., Farrelly R., O'Shaughnessy S.M., Robinson A.J. Energy efficiency of electrical infrared heating elements. *Applied Energy*.

2016;162:581-588.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.064>.

15. Butturini R., Ngo M. Flux mapping of radiant electric heaters. Maryland: U.S. Consumer Product Safety Commission; 2005. 20 p.

16. Schmidt F.M., Le Maout Ya., Monteix S. Modeling of infrared heating of thermoplastic sheet used in thermoforming process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;143-144:225-231.

17. Kurylenko N.I., Maksimov V.I., Mamontov G.Ya., Nagornova T.A. Thermal regime of industrial premises with heating systems based on gas infrared emitters. Tomsk: Tomsk polytechnic university; 2013. 101 p.

18. Shelekhov I.Iu., Shishelova T.I., Inozemtsev V.P., Pozhidaev V.V. Effective construction of a heating element for infra-red heating. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2016;3:118-124. EDN: WMNBFB.

19. Bodrov V.I., Smykov A.A. Temperature regime of rooms with radiant heating systems. *Kongress «Ustoichivoe razvitie regionov v basseinakh velikikh rek. priority v usloviyakh global'nykh izmenenii», v ramkakh 17-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki –2015» = Abstracts of the "Great Rivers - 2015" 17th International scientific and industrial forum*. 19-22 May 2015, Nizhnii Novgorod. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universiteta; 2015. p. 76-80. EDN: VCGDBV.

20. Bodrov V.I., Smykov A.A. Method of thermal calculation external walling in a building with heating system based infrared emitters. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie = Plumbing, heating, air-conditioning*. 2017;1:92-95. EDN: ZEOVB.

20. Bodrov V.I., Smykov A.A. Method of thermal calculation external walling in a building with heating system based infrared emitters. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie = Plumbing, heating, air-conditioning*. 2017;1:92-95. EDN: ZEOVB.

Информация об авторах

Гребнева Оксана Александровна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры городского
строительства и хозяйства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
старший научный сотрудник,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия,
e-mail: oksana@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1492-5552>

Лавыгина Ольга Леонидовна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры городского строительства
и хозяйства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: olgakot81@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9558-5018>

Алексеев Александр Владимирович,

к.т.н., старший научный сотрудник,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия,
e-mail: alexeev@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4051-8245>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Information about the authors

Oksana A. Grebneva,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Urban Construction and Economy,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
Senior Researcher,
Energy Systems Institute
SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: oksana@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1492-5552>

Olga L. Lavygina,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Urban Construction and Economy,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: olgakot81@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9558-5018>

Aleksandr V. Alekseev,

Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Energy Systems Institute
SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: alexeev@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4051-8245>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 12.01.2023.
Одобрена после рецензирования 01.02.2023.
Принята к публикации 03.02.2023.

Information about the article

The article was submitted 12.01.2023.
Approved after reviewing 01.02.2023.
Accepted for publication 03.02.2023.

**BIM как средство сквозного проектирования, технологии возведения и эксплуатации****Т.Л. Дмитриева¹, В.П. Яценко^{2✉}, И.А. Курышов³**^{1,2,3}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Технологии настоящего развиваются с колоссальной скоростью. Рост вычислительной мощности современных процессоров, развитие техники, технологий – все это без сомнения требует новых инструментов для обработки и систематизации информации. Технологии BIM-моделирования – необходимый инструмент в среде проектирования, строительства и даже эксплуатации зданий и сооружений. Они позволяют проектировать в «сквозном формате», а также систематизировать информацию об элементах объекта в одной информационной модели. Целью данной работы является исследование эффективности применения BIM-технологий в процессах проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений, а также развитие технологий информационного моделирования. В статье рассмотрены и проанализированы примеры использования BIM-технологий на примере двух больничных комплексов (*HUS Bridge* в Хельсинки и Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева), что еще раз подчеркивает преимущества использования методов информационного моделирования при строительстве общественно значимых и ответственных конструкций. По итогам рассмотрения объектов была доказана эффективность применения современных BIM-решений, особенно в части сокращения сроков строительства, определения единого информационного и коммуникационного пространства, устранения коллизий и автоматизированного расчета важнейших проектных, строительных и эксплуатационных параметров. Разработка стратегии реализации строительного проекта, интегрированное управление графическими данными, возможность реализации конструктивно и архитектурно сложных зданий – все эти факторы свидетельствуют о неоспоримом преимуществе использования BIM, по сравнению с распространенными методами проектирования зданий и сооружений.

Ключевые слова: BIM-технологии, BIM-моделирование, информационное пространство, эффективность применения BIM-технологий, проектирование, здания и сооружения

Для цитирования: Дмитриева Т.Л., Яценко В.П., Курышов И.А. BIM как средство сквозного проектирования, технологии возведения и эксплуатации // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 252–261. <https://elibrary.ru/jvyjyq>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-252-261>.

Original article**BIM as a means of end-to-end design, construction, and operation****Tatyana L. Dmitrieva¹, Vladimir P. Yashchenko^{2✉}, Ivan A. Kuryshov³**^{1,2,3}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Contemporary technologies are developing at a tremendous speed. The growing computing power of modern processors and rapid technological development – all of this undoubtedly requires new information processing and systematization tools. BIM modeling technology is an essential tool in the design, construction, and even operation of buildings and structures. This technology allows the end-to-end design of various objects, as well as systematization of information in a single information model. This work investigates the effectiveness of BIM technologies in the processes of design, construction, and operation of buildings and structures, as well as the development of information modeling technologies. The research is carried out using the examples of two hospital complexes, i.e., the HUS

Bridge in Helsinki and the National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology named after Dmitry Rogachev). Advantages of applying information modeling methods in the construction of socially significant and critical facilities are demonstrated. The conducted study proved the efficiency of modern BIM solutions, particularly in terms of reducing the construction period, determining the unified information and communication space, eliminating conflicts, and automated calculation of the most important design, construction, and operational parameters. BIM outperforms conventional design methods in terms of the possibility of developing a strategy for the implementation of the construction project, integrated management of graphic data, and creating structurally and architecturally complex facilities.

Keywords: BIM technologies, BIM modeling, information space, efficiency of application of BIM technologies, design, buildings and structures

For citation: Dmitrieva T.L., Yashchenko V.P., Kuryshov I.A. BIM as a means of end-to-end design, construction, and operation. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(2):252-261. (In Russ.). <https://elibrary.ru/jvyjyq>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-252-261>.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровизация эксплуатируемого оборудования, постоянное усовершенствование высокотехнологичных строительных материалов, рост количества конструктивных элементов зданий и сооружений, потребность в создании комплексных типовых технических решений для сокращения сроков и стоимости реализации проектов – все это факторы, определяющие развитие современного строительства. Именно данные факторы привели к идее создания единой информационной модели строительных объектов, отражающей их актуальное состояние на всех этапах жизненного цикла [1–4]. Данная модель предполагает определенную иерархию и систематизацию данных об объекте, различные уровни доступа к ней. Так, на стадии проектирования одновременный доступ к проекту имеют несколько специалистов по разным разделам рабочей документации (АР, АС, КЖ, КМ, ЭМ и другие). Кроме того, возможна параллельная работа экспертов смежных направлений: дизайнеров, архитекторов, IT-специалистов, сметчиков [5–9]. На стадии строительства за счет использования такой модели автоматически выполняется синхронизация календарных графиков подачи и расхода материалов, оптимизация работы транспортных систем и т.п. Данный подход к проектированию называется «сквозным».

«Сквозное» сопровождение модели особенно важно для процесса эксплуатации. Именно на этом этапе проект получает наибольшую экономическую выгоду, так как

дает полноценную информацию о состоянии инженерных сетей и материалов, позволяет рассчитать возможные сроки капитального ремонта, а также любую информацию, которая будет способствовать повышению эффективности эксплуатации объекта [10–11].

Таким образом, информационное моделирование дает возможность в режиме виртуальной реальности контролировать состояние объекта на протяжении всего жизненного цикла [12–19].

В настоящее время практикуется множество программных комплексов, позволяющих создавать информационные модели объектов капитального строительства и управлять ими¹. Это, прежде всего, продукты таких мировых лидеров, как *Autodesk*, *ArchiCAD*, *Tekla Structures*, *Digital Project*, *AllPlan*. В общей системе «сквозного» проектирования немаловажную роль играют также расчетные комплексы, такие как *SCAD Office*, семейство ЛИРА-САПР, *Лира-10*, *Micro-Fe* и др. Важно понимать, что при выборе того или иного программного обеспечения, создающего проект на основе BIM, необходимо наладить корректный обмен данными между программами, входящими в цепочку многомерного моделирования [20–23].

МЕТОДЫ

Для написания статьи были рассмотрены и изучены статьи и иные ресурсы, в том числе материалы всероссийской научно-практической конференции, проходившей в конце марта 2018 г., публикации научного журнала «Colloquim-journal» 2020 г.

В исследовательской работе применялись

¹Программы для BIM-проектирования – список зарубежных и российских САПР, использующих разработки BIM-технологии // ZWsoft. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.zwsoft.ru/stati/programmy-dlya-BIMproektirovaniya-spisok-zarubezhnyh-i-rossiyskihsapr-ispolzuyushchih--razrabotki-BIM-tehnologii> (02.04.2023).

следующие методы: наблюдение, сравнение, а также теоретические методы исследования, такие как анализ и синтез.

Определить степень эффективности применения BIM-технологий возможно при детальном анализе информации по реализованным и реализуемым объектам. Рассмотрим следующие примеры.

Больница HUS Bridge в Хельсинки

Один из самых шумевших проектов, реализуемых при помощи BIM-технологий. Проектируемое здание (рис. 1) представляет собой интеграцию двух основных корпусов больницы: Башни Мейлахти и Мейлахти Треугольника (рис. 2), а также больницы Тёёлё и части онкологического отделения в массивное высокотехнологичное сооружение².

Главной и далеко не последней особенностью проекта является параллельное проектирование и строительство сооружения. Бо-

лее того, строительство ведется блочным методом, имя которому «Большая комната», что подразумевает регулярные встречи проектировщиков, инвесторов, заказчиков, руководителей эксплуатации и других специалистов за одним столом. Часть оборудования будет устанавливаться в еще не законченный объект строительства. Конструктивные особенности возводимого сооружения следующие: этажность – 9 этажей; каркас состоит из стальных и железобетонных композитных колонн, треугольных балок и установленных сверху плит тонкостенного каркаса; фасады выполнены из термопрофилей, облицованных листовым металлом и стеклом с шелкографией. С точки зрения структурной инженерии, особенности здания включают большие стеклянные стены и крыши, блоки стволов с постнапряжением и сложную геометрию тихой комнаты со стальным каркасом.

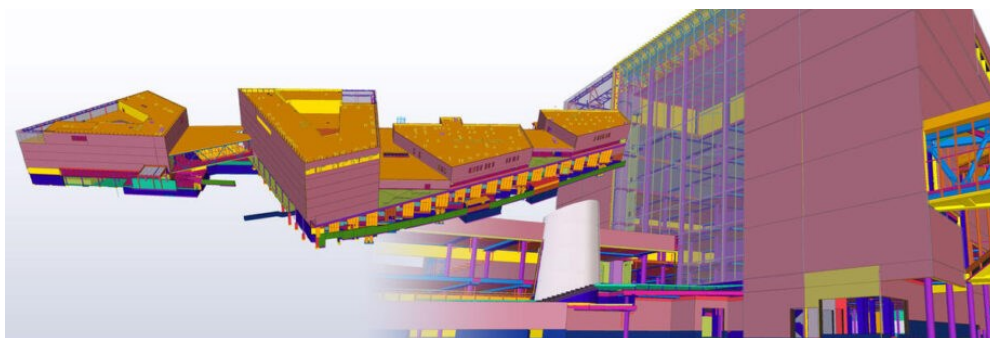


Рис. 1. Трехмерная модель проектируемого здания больницы
Fig. 1. 3D model of the designed hospital building



Рис. 2. Размещение корпусов Хельсинкской университетской больницы
Fig. 2. Location of the wings of Helsinki University Hospital

²Журнал «Автоматизация в промышленности». // Avtprom.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://avtprom.ru/news/2020/10/16/proekt-iz-rossii-voshel-> (13.04.2023).

Также сложность проектирования данного сооружения обусловлена необходимостью объединения в одной модели помещений с особым оборудованием (отделение интенсивной терапии, рентгенологии, операционные и др.).

Каков же вклад BIM-технологий?

Во-первых, уменьшение сроков. Дата запуска проекта – 2020 г. Уже к окончанию второго квартала с начала строительства было вовлечено 562 субподрядчика и около 3400 специалистов.

Изначально плановое время окончания строительства – конец 2024 г. Однако благодаря использованию технологий информационного моделирования, в том числе создания 4D-модели, в которой дополнительное измерение составляет время, что позволяет отойти от диаграммы Ганта и составить график производства работ на протяжении всего жизненного цикла, срок строительства сокращен на год, и оценивается как конец 2023 г.³

Во-вторых, уменьшение коллизий и повышение качества работ. Проект объединяет по меньшей мере 194 модели, что требует тщательной координации, которой невозможно было бы достичь, работая в разных информационных пространствах.

Таким образом, эффективность использования BIM была усилена координацией в работе проектировщиков, подрядчиков, поставщиков оборудования.

В-третьих, экономия инвестиционных средств, вытекающая из первых двух положительных эффектов. Сокращение времени реализации проекта сокращает операционные расходы, а уменьшение коллизий – внесение дополнительных изменений в конструктив здания, а также инженерные сети и состав оборудования⁴.

В качестве следующего примера рассмотрим опыт отечественных компаний по строительству нового корпуса Национального медицинского исследовательского центра детской гематологии, онкологии и иммунологии (НМИЦ ДГОИ) им. Дмитрия Рогачёва.

Корпус НМИЦ ДГОИ им. Дмитрия Рогачёва

В отличие от ранее приведенного приме-

ра, внедрение BIM-технологий в данный проект произошло на этапе строительства, однако даже в этом случае можно говорить о наличии положительного эффекта.

Генеральным проектировщиком и генеральным подрядчиком реализации проекта является АО «ГСПИ».

Техническим заказчиком и представителем строительного контроля выступает ОЦКС Росатома.

Благодаря проекту «Внедрение сквозных технологий информационного моделирования (BIM)», специалисты ОЦКС Росатома разработали и внедрили инновационную сквозную методологию применения технологий информационного моделирования, которая заключается в создании трех блоков информационных моделей: концептуальной (разрабатывалась в среде *Autodesk Revit*), проектная (стадия «П») и проектная (стадия «РД») – в едином информационном пространстве (техническое решение реализовано на свободно распространяемом программном комплексе *IMan*).

Концептуальная информационная модель опирается на метод объемного моделирования (рис. 3 и 4).

Данный тип моделирования необходим для определения пространственных границ объекта при условии пересечения его другими объемными моделями (в том числе моделями, характеризующими опасные зоны).

Приведем примеры 3-D моделирования, по результатам которого сформирована геометрически сложная пространственная модель (рис. 4).

Для подтверждения адекватности сформированной информационной модели проведено тестирование на соответствие требованиям к проектной модели «as designed» (стадия «РД») проекта.⁵

Созданная BIM-модель (рис. 5) подтвердила свою эффективность при составлении и согласовании проектно-сметной документации.

Также кратно улучшилось качество работы проектировщиков, что сказалось на успешной и досрочной реализации проекта в июне 2022 г.⁶

³Официальный сайт компании *Tekla* // *Tekla.com* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tekla.com/bim-awards/hus-bridge-hospital> (15.04.2023).

⁴Цифровое строительство // *Digital-build.ru* [Электронный ресурс]. URL: <https://digital-build.ru/bim-kak-eto-rabotaet-na-zapade/> (16.04.2023).

⁵Научный портал «Атомная энергия 2.0». // *Atomic-energy.ru* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.atomic-energy.ru/articles/2022/03/03/122478> (18.04.2023).

⁶Официальный сайт АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» // *Khlopin.ru* [Электронный ресурс]. URL: <https://khlopin.ru/?p=30013> (19.04.2023).

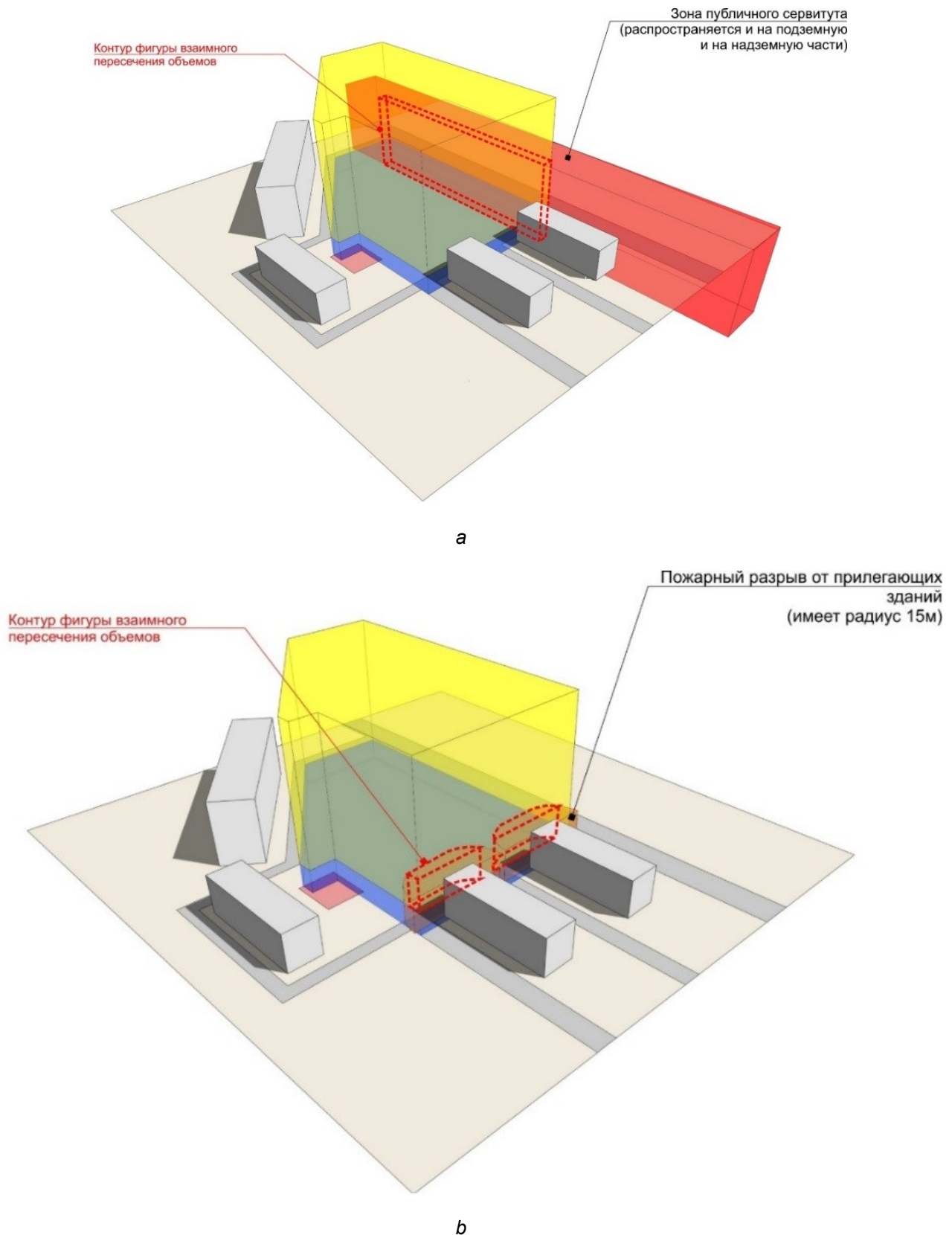


Рис. 3. Пересечение пространственной модели сооружения с зоной ограничений:
a – зона публичного сервитута; *b* – пожарный разрыв от прилегающих зданий

Fig. 3. Intersection of the spatial model of the construction with a constraint zone:
a – public easement zone; *b* – fire gap from adjacent buildings

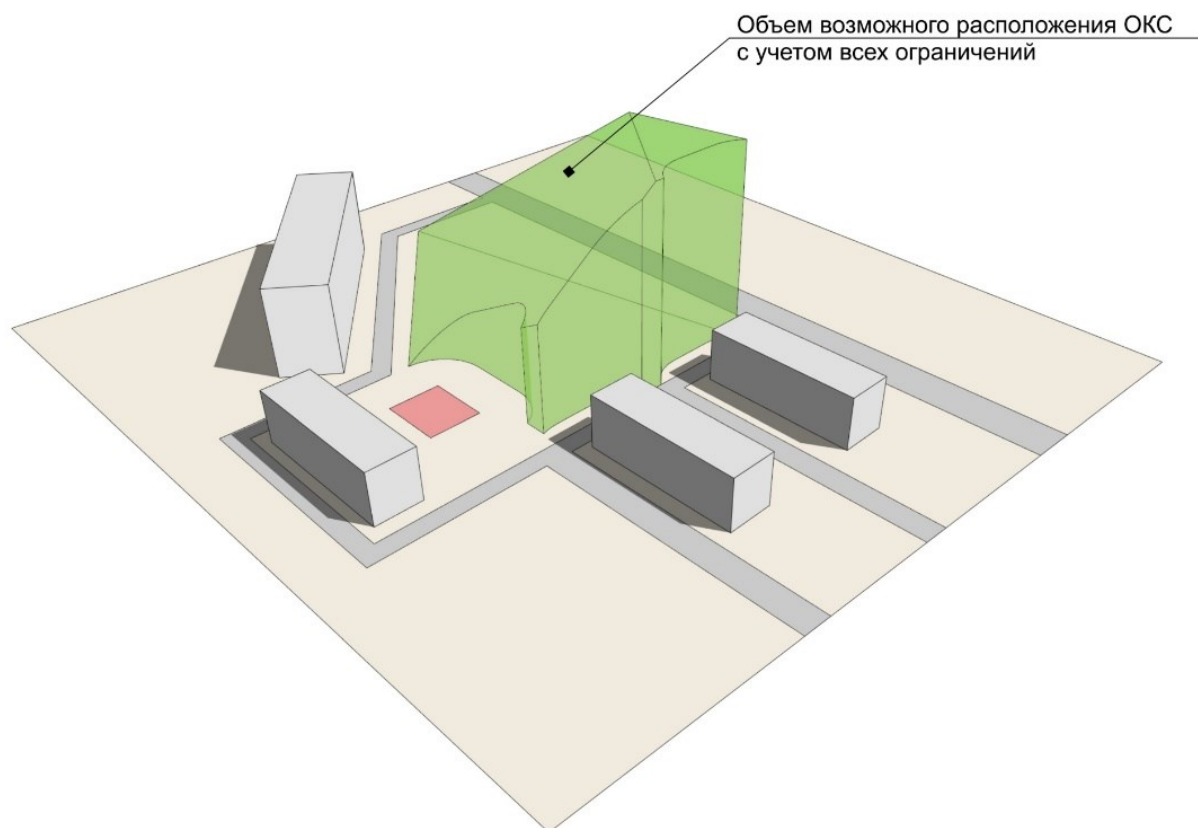


Рис. 4. Результирующий объем сооружения
Fig. 4. Resulting volume of the structure

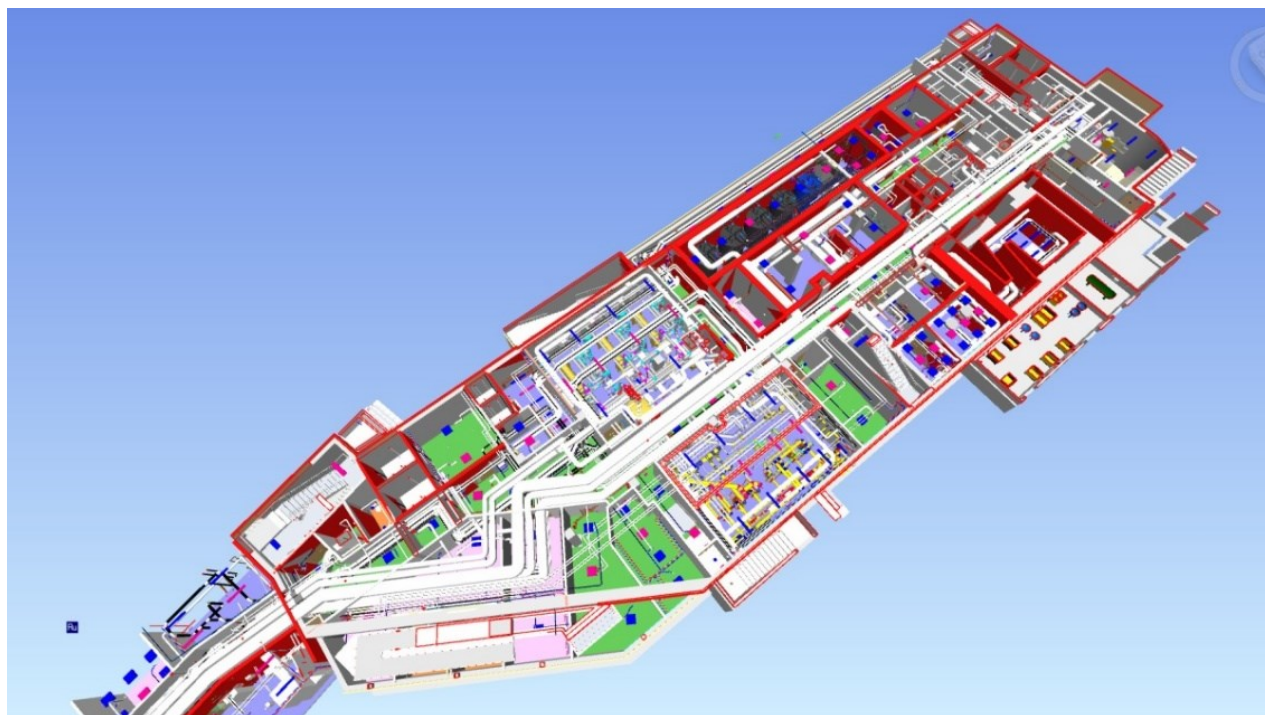


Рис. 5. Концептуальная информационная модель
Fig. 5. Conceptual information model

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современное строительство и проектирование трудно представить без использования BIM-технологий. Основные преимущества использования которых заключаются в следующем:

- возможность управления ключевыми этапами жизненного цикла объекта с помощью компьютерного моделирования;
- интеграция и систематизация разноплановых потоков информации в единой среде общих данных;

– ускоренное устранение коллизий и автоматизированный расчет важнейших проектных, строительных и эксплуатационных параметров;

– возможность создания конструктивно и архитектурно сложных сооружений с учетом финансовых показателей объекта;

– комплексное рассмотрение объекта как единого целого, состоящего из множества элементов и связующих частей (оборудования, конструктивных элементов и т. д.).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Разов И.О., Березнев А.В., Коркишко О.А. Проблемы и перспективы внедрения BIM технологий при строительстве и проектировании // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 29–30 марта 2018 г.). СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. С. 27–31. EDN: YUIQPT.
2. Грибова И.С., Хашпаханц Н.О. Эффективность BIM технологии проектирования // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". 2018. № 2. С. 235–242. EDN: XNRMVV.
3. Талапов В.В. Основы BIM: введение в информационное моделирование зданий. М.: ДМК Пресс, 2011. 392 с.
4. Букунова О.В., Букунов А.С. Трудности внедрения информационного моделирования объектов строительства в России // Научный форум: Инновационная наука: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. М.: Международный центр науки и образования, 2017. № 5 (6). С. 15–21. EDN: ZEFFJL.
5. Panya D.S., Kim T., Choo S. An interactive design change methodology using a BIM-based Virtual Reality and Augmented Reality // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 68. P. 106030 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106030>.
6. Lien L.C., Dolgorsuren U. BIM-based steel reinforcing bar detail construction design and picking optimization // Structures. 2023. Vol. 49. P. 520–536. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.01.004>.
7. Chuang T.Y., Yang M.J. Change component identification of BIM models for facility management based on time-variant BIMs or point clouds // Automation in Construction. 2023. Vol. 147. P. 104731. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104731>.
8. Condotta M., Scanagatta C. BIM-based method to inform operation and maintenance phases through a simplified procedure // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 65. P. 105730. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105730>.
9. Shi Y., Xu J. BIM-based information system for econo-enviro-friendly end-of-life disposal of construction and demolition waste // Automation in Construction. 2021. Vol. 125. P. 103611. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103611>.
10. Алексеева Н.С. Применение сквозных цифровых технологий при управлении проектированием и строительством // Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли: сб. тр. Всерос. науч.-практ. и учеб.-метод. конф. (г. Санкт-Петербург, 01–04 июня 2021 г.). СПб.: Политех-пресс, 2021. Ч. 1. С. 224–228. EDN: QBMTJW.
11. Баженов В.К., Червонцева М.А. К вопросу создания сводной информационной модели объекта капитального строительства // Вестник Московского информационно-технологического университета – Московского архитектурно-строительного института. 2022. № 1. С. 19–22. https://doi.org/10.52470/2224669X_2022_1_19. EDN: RJWOWG.
12. Хан А.А. Анализ тенденций и возможные подходы к формированию контрактных требований в проектах, разрабатываемых на основе технологий информационного моделирования и информационной модели объекта моделирования (BIM) // International Journal of Open Information Technologies. 2022. Т. 10. № 8. С. 102–112. EDN: ZSDIDG.
13. Ерофеев В.Т., Пиксайкина А.А., Булгаков А.Г., Ермолаев В.В. Цифровизация в строительстве, как эффективный инструмент современного развития отрасли // Эксперт: теория и практика. 2021. № 3 (12). С. 9–14. https://doi.org/10.51608/26867818_2021_3_9. EDN: LJDPKJ.
14. Загидуллина Г.М., Иванова Р.М., Новширванов М.Л. Анализ текущих проблем развития BIM технологий на рынке капитального строительства // Московский экономический журнал. 2022. Т. 7. № 12. С. 483–500. EDN: AXEIKW. https://doi.org/10.55186/2413046X_2022_7_12_717.
15. Каракозова И.В., Малыха Г.Г., Куликова Е.Н., Павлов А.С., Панин А.С. Организационное сопровождение BIM-технологий // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 12 (135). С. 1628–1637. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.12.1628-1637>.

16. Савина А.Г., Малявкина Л.И., Савин Д.А. Теоретико-методологические основы построения цифровой инфраструктуры управления объектами капитального строительства на базе BIM // Russian Journal of Economics and Law. 2023. Т. 17. № 1. С. 90–109.
<https://doi.org/10.21202/2782-2923.2023.1.90-109>.
17. Король Е.А., Дрепалов И.Ф. Реконструкция зданий с использованием BIM-технологий // Системные технологии. 2021. № 41. С. 47–51.
https://doi.org/10.55287/22275398_2021_4_47.
EDN: CSOOOU.
18. Leygonie R., Motamedi A., Iordanova I. Development of quality improvement procedures and tools for facility management BIM // Developments in the Built Environment. 2022. Vol. 11. P. 100075.
<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100075>.
19. Fernández-Mora V., Navarro I.J., Yepes V. Integration of the structural project into the BIM paradigm: A literature review // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 53. P. 104318.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104318>.
20. Orazi L., Reggiani B. A novel algorithm for a continuous and fast 3D projection of points on triangulated surfaces for CAM/CAD/CAE applications // Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. 2022. Vol. 34. Iss. 4. P. 1240–1245.
<https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.06.005>.
21. Khan M.T.H., Rezwana S. A review of CAD to CAE integration with a hierarchical data format (HDF)-based solution // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. 2021. Vol. 33. Iss. 4. P. 248–258.
<https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.009>.
22. Celik Yasin, Petri Ioan, Barati Masoud. Blockchain supported BIM data provenance for construction projects // Computers in Industry. 2023. Vol. 144. P. 103768.
<https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.009>.
23. Shiraiwa S., Greenwald M., Stillerman J.A., Wallace G.M., London M.R., Thomas J. Tools to export published datasets together with metadata from IDL/Python/MATLAB and πScope // Fusion Engineering and Design. 2018. Vol. 130. P. 104–106.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.02.052>.

REFERENCES

1. Razov I.O., Bereznev A.V., Korkishko O.A. Problems and prospects of implementing BIM technologies in construction and design. In: *BIM-modelirovaniye v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii = BIM Modeling in the tasks of construction and architecture: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. 29–30 March 2018, Saint Petersburg. Saint Petersburg: Saint Petersburg state university of architecture and civil engineering; 2018. p. 27–31. (In Russ.). EDN: YUIQPT.
2. Gribkova I.S., Khashpakyants N.O. Efficiency of BIM technology design. *Elektronnyy setevoy politematicheskii zhurnal "Nauchnyye trudy KubGTU"*. 2018;2:235–242. (In Russ.). EDN: XNRMVV.
3. Talapov V.V. Fundamentals of BIM: an introduction to information modeling of buildings. Moscow: DMK Press; 2011. 392 p. (In Russ.).
4. Bukunova O.V., Bukunov A.S. Difficulties of implementing information modeling of construction objects in Russia. In: *Nauchnyi forum Innovatsionnaya nauka: materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Scientific Forum: Innovative Science: materials of the VI International Scientific and Practical Conference*. 28 August–04 September 2017, Moscow. Moscow: International Center for Science and Education; 2017. Vol. 5. p. 15–21. (In Russ.). EDN: ZEFFJL.
5. Panya D.S., Kim T., Choo S. An interactive design change methodology using a BIM-based Virtual Reality and Augmented Reality. *Journal of Building Engineering*. 2023;68:106030.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106030>.
6. Lien L.C., Dolgorsuren U. BIM-based steel reinforcing bar detail construction design and picking optimization. *Structures*. 2023;49:520–536.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.01.004>.
7. Chuang T.Y., Yang M.J. Change component identification of BIM models for facility management based on time-variant BIMs or point clouds. *Automation in Construction*. 2023;147:104731.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104731>.
8. Condotta M., Scanagatta C. BIM-based method to inform operation and maintenance phases through a simplified procedure. *Journal of Building Engineering*. 2023;65:105730.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105730>.
9. Shi Y., Xu J. BIM-based information system for econo-enviro-friendly end-of-life disposal of construction and demolition waste. *Automation in Construction*. 2021;125:103611.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103611>.
10. Alekseeva N.S. Application of end-to-end digital technologies in design and construction management. *Fundamental'nyye i prikladnyye issledovaniya v oblasti upravleniya, ekonomiki i trgovli: sbornik trudov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy i uchebno-metodicheskoy konferentsii = Fundamental and applied research in management, economics and trade: collection of all-Russian scientific and practical conference proceedings*. 01–04 Juny 2021, Saint-Petersburg. Saint-Petersburg: Polytech-press. 2021. Vol. 1. P. 224–228. (In Russ.). EDN: QBMTJW.
11. Bazhenov V.K., Chervontseva M.A.. On the creation of a consolidated information model for a capital construction structure. *Vestnik Mos-*

kovskogo informatsionno-tekhnologicheskogo universiteta – Moskovskogo arkhitekturno-stroitel'nogo instituta. 2022;1:19-22. (In Russ.). https://doi.org/10.52470/2224669X_2022_1_19. EDN: RJWOWG.

12. Khan A.A. Analysis of trends and possible approaches to the formation of contract requirements in projects developed on the basis of information modeling technologies and the information model of the modeling object (BIM). *International Journal of Open Information Technologies*. 2022;8:102-112. (In Russ.). EDN: ZSDIDG.

13. Erofeev V.T., Piksaikina A.A., Bulgakov A.G., Ermolaev V.V. Digitalization in the construction as an effective tool for the modern development of the industry. *Ekspert: teoriya i praktika = Expert: Theory and Practice*. 2021;3:9-14. (In Russ.). https://doi.org/10.51608/26867818_2021_3_9. EDN: LJDPKJ.

14. Zagidullina G.M., Ivanova R.M., Novshirvanov M.L. Analysis of current problems of bim technologies development in the capital construction market. *Moskovskiy ekonomicheskij zhurnal = Moscow Economic Journal*. 2022;7(12):483-500. (In Russ.). https://doi.org/10.55186/2413046X_2022_7_12_71. EDN: AXEIWK.

15. Karakozova I.V., Malyha G.G., Kulikova E.N., Pavlov A.S., Panin A.S. Organizational support of BIM-technologies. *Vestnik MGSU*. 2019;14(12):1628-1637. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.12.1628-1637>.

16. Savina A.G., Malyavkina L.I., Savin D.A. Theoretic-methodological bases of it maintenance of project management corporate system in the project-oriented organizations. *Russian Journal of Economics and Law*. 2023;17(1):90-109. (In Russ.). <https://doi.org/10.21202/2782-2923.2023.1.90-109>.

17. Korol E.A., Drepalov I.F. Reconstruction of buildings using Bim technologies. *Sistemnyye*

tekhnologii = System Technologies. 2021;4:47-51. (In Russ.).

https://doi.org/10.55287/22275398_2021_4_47. EDN: CSOOOU.

18. Leygonie R., Motamedi A., Iordanova I. Development of quality improvement procedures and tools for facility management BIM // *Developments in the Built Environment*. 2022. Vol. 11. P. 100075. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100075>.

19. Fernández-Mora V., Navarro I.J., Yepes V. Integration of the structural project into the BIM paradigm: A literature review // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 53. P. 104318. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104318>.

20. Orazi L., Reggiani B. A novel algorithm for a continuous and fast 3D projection of points on triangulated surfaces for CAM/CAD/CAE applications // *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2022. Vol. 34. Iss. 4. P. 1240-1245.

<https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.06.005>

21. Khan M.T.H., Rezwana S. A review of CAD to CAE integration with a hierarchical data format (HDF)-based solution // *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2021. Vol. 33. Iss. 4. P. 248-258.

<https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.009>.

22. Celik Yasin, Petri Ioan, Barati Masoud. Blockchain supported BIM data provenance for construction projects // *Computers in Industry*. 2023. Vol. 144. P. 103768. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.009>.

23. Shiraiwa S., Greenwald M., Stillerman J.A., Wallace G.M., London M.R., Thomas J. Tools to export published datasets together with metadata from IDL/Python/MATLAB and πScope // *Fusion Engineering and Design*. 2018. Vol. 130. P. 104-106.

<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.02.052>.

Информация об авторах

Дмитриева Татьяна Львовна,

д.т.н., доцент,
заведующий кафедрой механики и
сопротивления материалов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: dmitrievat@list.ru
<http://orcid.org/0000-0002-4622-9025>

Яценко Владимир Петрович,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры механики и сопротивления
материалов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: vp_yashenko@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3800-0570>

Information about the authors

Tatyana L. Dmitrieva,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Mechanics
and Resistance of Materials,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: dmitrievat@list.ru
<http://orcid.org/0000-0002-4622-9025>

Vladimir P. Yashchenko,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Mechanics and Resistance of Materials,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: vp_yashenko@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3800-0570>

Курышов Иван Андреевич,
главный специалист отдела организации
и контроля строительно-монтажных работ
Проектного офиса (ООиК СМР ПО)
ООО «ГРК «Быстринское»,
672038, г. Чита, ул. Шилова, 99 Г, Россия
e-mail: vanyagri88@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0001-3028-6308>

Ivan A. Kuryshov,
Chief Specialist of the Department
of Organization and control of construction
and installation works of the Project Office,
"GRK "Bystrinskoe" LLC,
99G Shilova St., Chita 672038, Russia
e-mail: vanyagri88@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0001-3028-6308>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 16.02.2023.
Одобрена после рецензирования 15.03.2023.
Принята к публикации 17.03.2023.

Information about the article

The article was submitted 16.02.2023.
Approved after reviewing 15.03.2023.
Accepted for publication 17.03.2023.



Исследование морозостойкости литых поропластов многослойных стеновых ограждений

Н.А. Емельянова

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Целью настоящего исследования является экспериментальная проверка возможности использования в зимних условиях литых композитов «Поропласт CF02» в качестве термовкладышей многослойных стеновых ограждений жилых и общественных зданий. Применение литых композитов в качестве термоизоляционного компонента многослойного ограждения уже давно является одним из технологически удобных, функционально эффективных и апробированных решений. Для круглогодичного ведения строительных работ с использованием литых композитов важно учитывать влияние условий внешней среды (температуры и влажности) на кинетику значимых параметров теплоизоляции, так как именно ее следует рассматривать в качестве критерия эксплуатационной долговечности. Циклические *T-W* испытания проводились в соответствии с нормативно стандартизированными методиками. Выполнена сравнительная оценка теплоизолирующих качеств литого композита «Поропласт CF02» при различных условиях полимеризации и после циклического замораживания и оттаивания различной интенсивности. В работе приведены результаты экспериментальных исследований сохраняемости теплозащитных свойств литых утеплителей из композита «Поропласт CF02» в условиях, моделирующих их работу в многослойных ограждающих конструкциях зданий в районах сурового климата. Проведенное экспериментальное исследование позволило подтвердить стабильность свойств литых утеплителей из композита «Поропласт CF02» при различных естественных условиях полимеризации и определяющее влияние влажности внешней среды на кинетику их изменения.

Ключевые слова: многослойные ограждающие конструкции, теплоизоляционные материалы, теплопроводность, карбамидный поропласт, климатическая долговечность

Для цитирования: Емельянова Н.А. Исследование морозостойкости литых поропластов многослойных стеновых ограждений // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 262–270. <https://elibrary.ru/kinyuc>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-262-270>.

Original article

Research into the frost resistance of cast foam plastics in multilayer wall envelopes

Natalia A. Emelyanova

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The possibility of using *Poroplast CF02* cast composites under winter conditions as thermofillers for multilayer wall enclosures of residential and public buildings was investigated. The use of cast composites as a thermo-insulating component in multilayer enclosures has long been considered as a technologically convenient, functionally effective, and reliable solution. When organizing year-round construction works with the use of cast composites, the influence of ambient conditions (temperature and humidity) on the kinetics of thermal insulation parameters should be taken into account. It is thermal insulation that should be considered as an operational durability criterion. Cyclic *T-W* tests were conducted in accordance with standardized regulatory methods. A comparative assessment of the thermo-insulating parameters of *Poroplast CF02* cast composite samples was performed under varied polymerization conditions and after cyclic freezing and thawing of different intensities. The results of experimental studies into the stability of the thermal characteristics of

© Емельянова Н.А., 2023

For citation: Emelyanova N.A. Research into the frost resistance of cast foam plastics in multilayer wall envelopes. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(2):262-270. (In Russ.). <https://elibrary.ru/kinyuc>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-262-270>.

Одним из технологически удобных, функционально эффективных и многократно апробированных [8, 25–27] решений рассматриваемых вопросов является использование ли-

Циклические $T-W$ испытания велись на ку-

263

бических образцах с ребром 50 мм и 100 мм, количество которых принималось достаточным для получения статистически значимых результатов [19]. Проведению испытаний предшествовало водонасыщение образцов теплой водой до требуемого влагосодержания. Цикл испытаний составлял 8 часов замораживания до минус 20°C и 16 ч оттаивания в паровоздушной среде с различной влажностью (40–90%) при температуре 18–20°C. По истечении каждых 30 циклов (Ц30) производился осмотр с фиксацией внешних дефектов, формоизменения, сорбционной влажности и теплопроводности по нормативно стандартизированным методикам (ГОСТ 24816 и ГОСТ 30256). Сорбционная способность образцов (ω_i) оценивалась изменением массы исходного и стабилизированного (в заданной среде) состояния. Измерение теплопроводности

сти велось "Зондом", погруженным в исследуемый образец.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Важнейшим показателем изоляционных свойств является пористость материала, структура которой характеризуется [16–18, 20, 24] ячеистой (макропористость) и межпоровой (пористость перегородок) составляющей. Средние показатели пористости исследуемого поропласта приведены в табл. 1 и свидетельствуют о сопоставимых значениях макропористости и снижении пор перегородок при увеличении длительности замораживания.

При этом следует отметить однородность экспериментальных показателей (коэффициент Стюдента 2,45–2,78) независимо от условий полимеризации.

Таблица 1. Усредненные показатели пористости
Table 1. Average indicators of porosity

Условия полимеризации	Плотность, кг/м ³	Начальная влажность, %	Открытая пористость, %	Микропористость, %	Закрытая пористость, %
Положительная температура	21,8	13	95,5	1,67	2,9
Кратковременное замораживание	15	15	96,8	1,6	2,2
Длительное замораживание	14,5	15	97,7	1,05	1,3

Анализ внешних признаков опытных образцов позволяет судить о том, что циклическое замораживание без дополнительного водонасыщения (погружения в воду) не ведет к существенным структурным изменениям.

В образцах стандартизированных режимов полимеризации на всей базе воздействий не наблюдались внешние поверхностные повреждения, а изменение массы составляло 1,5–2% с постоянной кинетикой снижения.

Поропласт морозных условий полимеризации оказался менее устойчивым при 10% снижения массы и образовании поверхностных трещин.

При этом следует отметить, что на последних циклах (>60 Ц30) происходила заметная стабилизация состояния. При несомненной познавательной значимости внешних признаков структурной стабильности функциональная долговечность поропласта определяется сохранностью кондиционных параметров теплоизолирующих свойств, оцениваемых кинетикой сорбционного поглощения и коэф-

фициентом теплопроводности.

Экспериментальное определение сорбционной влажности выполнено по ГОСТ 17177-94², предусматривающему ее оценку по количеству адсорбированной воды высушенным материалом.

Поэтому опытные образцы сушили в шкафу до постоянной массы при температуре 105°C с последующим охлаждением в эксикаторе над раствором хлористого кальция.

Сорбционное поглощение оценивалось по результатам прироста массы образцов после суточного хранения над водной средой.

С учетом целевых задач исследования их кинетика анализируется во взаимосвязи с количеством циклов нестационарных температурных воздействий (N) и последующего водопоглощения (W_c) в паровоздушной среде различной влажности. Основные значения верхнего диапазона 95% обеспеченности сорбции образцов и их прирост в циклическом процессе (ΔW_c) приведены в табл. 2.

²ГОСТ 17177-94 Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний // [Электронный ресурс]. URL: docs.cntd.ru (10.11.2022).

Таблица 2. Постциклическая сорбционная способность поропласта
Table 2. Postcyclic sorption capacity of the poroplastic

Влажность среды, %	ЦЗО	Серия «ОП»			Серия «МП»			Примечание
		W_c , %	ΔW_c , %	ω_c , %/цикл	W_c , %	ΔW_c , %	ω_c , %/цикл	
40	30	14,4	0,7	0,023	14,9	0,8	0,027	Исходные параметры сорбции 13,7–14,1 соответственно для серии «ОП» и «МП»
	60	–	–	0,012	14,8	0,7	0,012	
	90	–	–	0,008	14,9	0,8	0,009	
60	30	14,8	1,4	0,037	15,1	1,0	0,033	
	60	15,1	1,4	0,023	15,1	1,0	0,017	
	90	15,0	1,3	0,014	15,2	1,1	0,012	
80	30	16,5	2,8	0,093	16,5	2,4	0,081	
	60	16,3	2,6	0,043	16,5	–	0,042	
	90	16,4	2,7	0,031	16,5	–	0,027	
90	30	19,1	5,5	0,183	19,8	5,7	0,190	
	60	19,2	5,6	0,092	20,3	6,2	0,103	
	90	19,3	5,7	0,063	20,5	6,4	0,071	

Подтверждается установленное ранее [10, 27] сходство структурной трансформации поропласта различных условий полимеризации, характеризующее сопоставимыми изменениями сорбции образцов двух серий на всех этапах температурно-влажностных воздействий. При этом отсутствует ощутимое влияние количества циклов, что свидетельствует о высокой демпфирующей способности мелкодисперсной структуры поропласта и проблематичности использования этого фактора в прогнозировании его эксплуатационной долговечности.

Для анализа изменений проведено исследование параметров гигрометрического равновесия с окружающей средой, которое зависит от ее влажности и температуры.

Известно [16–18, 28, 29], что поглощение материалом влаги свидетельствует о сорбции, а уменьшение – о десорбции. Их определение велось в соответствии с регламентированной методикой³ в искусственно создаваемых паровоздушных средах с относительной влажностью воздуха 40–97%. Наблюдается высокая чувствительность поропластов с морозными последствиями к влажности среды постциклических условий использования (рис. 1 и 2). Увеличение влажности в два раза ведет к резкому возрастанию прироста удель-

ной (за один цикл) сорбции утеплителя.

Интенсивность поглощения повышается при $W \geq 80\%$, что может быть объяснимо сопутствующим ростом капиллярного водопоглощения.

Независимо от физических закономерностей сорбционных процессов, полученные результаты свидетельствуют о возможности использования показателей влажности района и температур зимнего периода для прогнозирования деструктивных процессов в утеплителях многослойных ограждений зданий.

Что касается изменения теплопроводности образцов обеих серий, то ее исходное значение ($\lambda = 0,027$ Вт/м · °С) практически не изменялось на всей базе T - W воздействий с небольшой (3–4%) тенденцией возрастания. Увеличение влажности поропласта до 100% (по массе) не ведет к снижению термосопротивления и влияние количества циклов сказывается (рис. 3) при влагонасыщении более 150% (по массе). В реальных условиях подобное влагонасыщение структуры термовкладышей многослойных ограждений маловероятно. Вероятное влагосодержание теплоизолятора при используемых конструкциях ограждения не превышает 25% [10, 28, 29].

³ГОСТ 24816-2014 Материалы строительные. Метод определения равновесной сорбционной влажности // Кодекс.ру [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200117808> (10.11.2022).

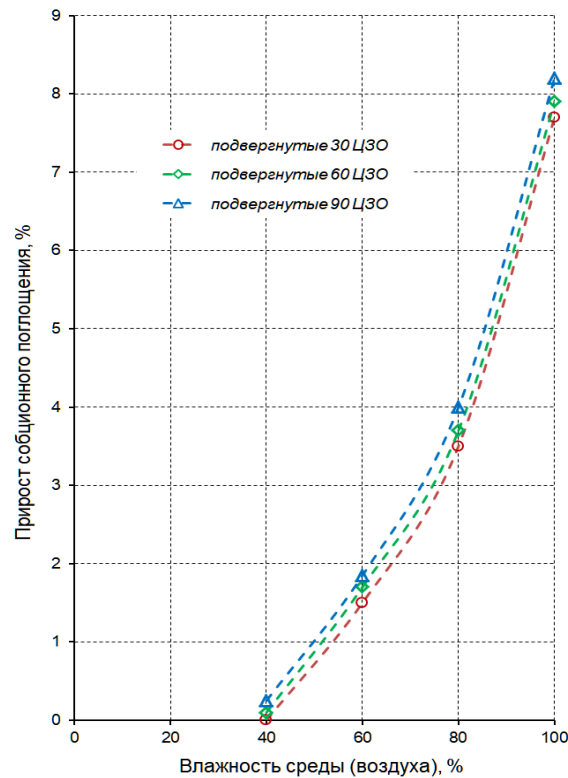


Рис. 1. Кинетика удельных приращений сорбции поропласта (серия «ОП») нормальной полимеризации

Fig. 1. Kinetics of specific increments of foam plastic sorption (series «OP») normal polymerization

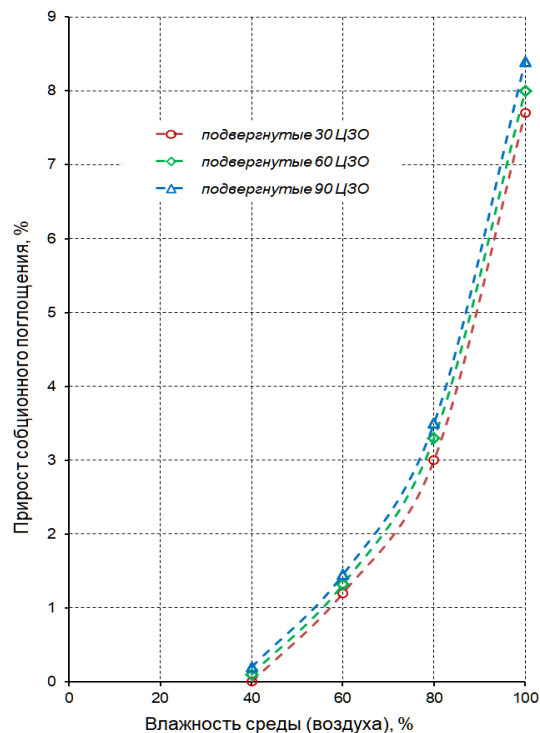


Рис. 2. Кинетика удельных приращений сорбции поропласта морозной полимеризации

Fig. 2. Kinetics of Specific Increments of pore plastic sorption frost polymerization

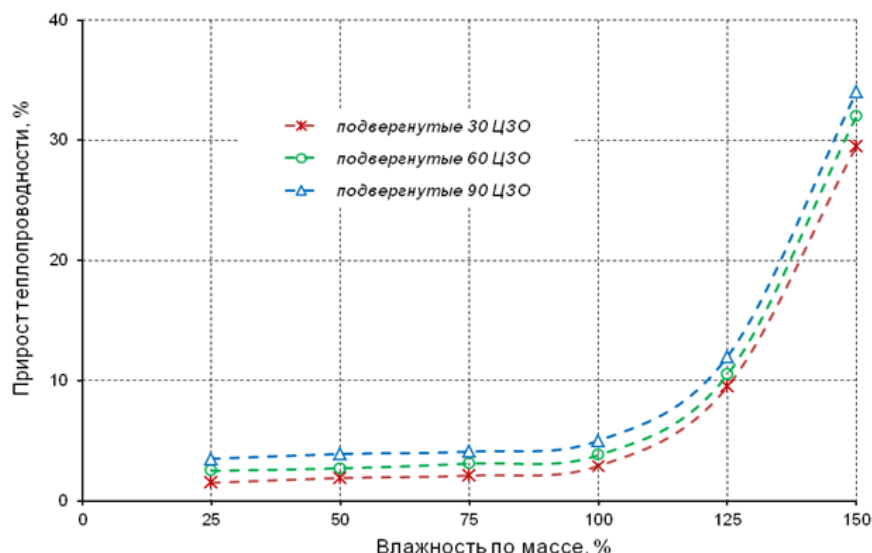


Рис. 3. Динамика роста теплопроводности в циклическом замораживании
Fig. 3. Dynamics of increase in thermal conductivity in cyclic freezing

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенного исследования экспериментально установлено следующее:

1. Литые утеплители из композита «Поропласт CF02», сформированные в различных термовлажностных условиях полимеризации, обладают сопоставимыми теплотехническими

свойствами и их сохраняемостью в циклических процессах замораживания и оттаивания.

2. Влажность внешней среды является одним из значимых факторов прогнозирования расчетной долговечности многослойных ограждающих конструкций с литыми утеплителями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Бобрышев В.В. Однослойные и многослойные ограждающие конструкции здания // Молодой ученый. 2018. № 47 (233). С. 34–37. EDN: YOYXON.
- Романов И.А. К вопросу о конструктивно-технологических системах наружных стен жилых малоэтажных зданий // Молодой ученый. 2019. № 22 (260). С. 134–138. EDN: MDXOQC.
- Мусорина Т.А., Гамаюнова О.С., Петриченко М.Р. Обоснование конструктивных мероприятий по увеличению энергоэффективности стеновых ограждений // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 11 (110). С. 1269–1277. EDN: TAUMWV. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.11.1269-1277>.
- Yokubova M.T. The role of heat containing walls in increasing the energy efficiency of buildings // Scientific progress. 2022. Vol. 3. No. 4. P. 85–88.
- Gnezdilova O., Kudryavtseva V., Terenteva N. Modern effective technologies applied for constructing external walls // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 828. No. 1. P. 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/828/1/012008>.
- Хатина Е.В. Динамическая теплоизоляция ограждающих конструкций зданий // Ползуновский вестник. 2011. № 1. С. 224–228. EDN: OCSKIR.
- Ватолкин С.М. Влияние типов утеплителей на качество многослойных строительных конструкций // Проектирование и строительство в Сибири. 2003. № 1. С. 22–24.
- Емельянова Н.А. Исследование технологических аспектов применения литых утеплителей в ограждающих конструкциях зданий // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 12 (95). С. 116–120. EDN: RHIBPE.
- Москвитин В.А., Емельянова Н.А., Машович А.Я. Экспериментальные исследования показателей воздухопроницаемости композита «Поропласт CF» // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9. № 2 (29). С. 342–353. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-2-342-353>. EDN: XCGLQU.
- Москвитин В.А., Пинус Б.И., Емельянова Н.А., Москвитин Д.В. Долговечность слоистых ограждающих конструкций с литыми композитами // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2015. № 4 (15). С. 151–158. EDN: VHDRGF.
- Сакмарова Л.А., Бахмисова М.А. Многослойные ограждающие конструкции и их свойства при температурных воздействиях // Новое в архитектуре, проектировании строительных кон-

струкций и реконструкции: материалы IV Международной (X Всероссийской) конференции (г. Чебоксары, 21–22 ноября 2018 г.). Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2018. С. 88–96. EDN: ISUHBL.

12. Tojiboyev B.T. Development of thermal insulation materials with low thermal conductivity on the basis of local raw MATERIALS // Scientific progress. 2021. Vol. 2. No. 8. P. 340–345.

13. Mokhammed A.R., Naimi S. The Effectiveness of Thermal Insulation of the Exterior Composite Walls of Buildings in Iraq Based on Different Materials and Climate Regions using Engineering Applications // International Journal of Intelligent Systems and Application in Engineering. 2023. Vol. 11. No. 4s. P. 594–601.

14. Сигачев Н.П. Расчет нестационарных тепловых процессов с учетом воздухообмена и проблемы нормирования теплозащиты зданий // Экспресс-Информация. Серия Строительство, проектирование. 2001. № 1. С. 23–33.

15. Силаенков Е.С. Методика определения долговечности системы утепления наружных стен с эффективным утеплителем // Строительные материалы. 2001. № 1. С. 15–17.

16. Rhee-Duverne S., McCaig I., Orr S., Zhang H., Viles H.A. Assessing moisture in porous traditional building materials // 1st International Conference on Moisture in Buildings 2021 (ICMB21) (London, 28–29 June 2021). London: UCL, 2021. <https://doi.org/10.14293/ICMB210054>.

17. Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах. М.: Химия, 1982. 320 с.

18. Карнаузов А.П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1999. 470 с.

19. Tusnina V., Tusnin A., Alekperov R. Experimental and theoretical studies of the thermal efficiency of multilayer non-uniform building enclosures // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 45. P. 103439 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103439>. EDN: MIJVB.

20. Гнездилова О.А. Оценка теплозащитных качеств ограждающей конструкции // Научное обозрение. 2007. № 1. С. 55–57.

21. Критерии оценки качества и выбора теплоизоляционных материалов // Технологии строительства. 2005. №2. С. 5–15.

22. Vatin N.I., Pestryakov I.I., Sultanov Sh.T., Ogi-

dan T., Yarunicheva Y.A., Kiryushina A.P. WATER VAPOUR BY DIFFUSION AND MINERAL WOOL THERMAL INSULATION MATERIALS // Magazine of Civil Engineering. 2018. №5 (81). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/water-vapour-by-diffusion-and-mineral-wool-thermal-insulation-materials> (19.03.2023).

23. Хлевчук В.П. Бессонов И.В., Румянцев И.А., Сигачев Н.П. и др. К вопросу о стойкости пенопластов и волокнистых утеплителей в ограждающих конструкциях зданий // Сб. докладов: Проблемы строительной теплофизики систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях, М.: НИИСФ. 2001. С. 255–258.

24. Гнездилова О. А. Исследование влияния эксплуатационных факторов на теплопроводность "Поропласта CF02" // Проблемы и перспективы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации железных дорог: труды всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Иркутск: ИРГУПС, 2009. Т. 1. С. 169–173.

25. Москвитин В.А., Пинус Б.И., Емельянова Н.А. Эффективность использования литых утеплителей в стеновых ограждениях малоэтажных зданий // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 2 (73). С. 110–114. EDN: PWMETR.

26. Москвитин В.А., Шишкин А.В., Гнездилова О.А. и др. Эффективные слоистые каменные наружные конструкции с теплоизоляцией из композита "Поропласт CF02". ТУ 5741-002-16602333-2006: утв.000 "Фоампласт", ООО "Иркут-Инвест". Иркутск. 2006. 16 с.

27. Гнездилова О.А., Москвитин В.А. Теплоэнергосберегающие ограждающие конструкции с утеплителем из композита "Поропласт CF02" // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2007. № 2. С. 2–6.

28. Xu, Chengcheng & Li, Shuhong & Zou, Kaikai. (2019). Study of Heat and Moisture Transfer in Internal and External Wall Insulation Configurations. Journal of Building Engineering. 24. DOI: 10.1016 / j.jobe.2019.02.016.

29. Gagarin V., Kozlov V., Zubarev K. Determination of Maximum Moisture Zone on Enclosing Structures: Sustainable Buildings in Cold Climates // Cold Climate HVAC. 2019. P. 925–932. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00662-4_78.

REFERENCES

1. Bobryshev V.V. Single-layer and multi-layer building envelopes. *Molodoi uchenyi = Young scientist*. 2018;47:34–37. (In Russ.). EDN: YOYXOH.

2. Romanov I.A. To the question of constructive-technological systems of external walls of residential low-rise buildings. *Molodoi uchenyi = Young*

scientist. 2019;22:134–138. (In Russ.). EDN: MDXOQC.

3. Musorina T.A., Gamayunova O.S., Petrichenko M.R. Substantiation of constructive measures to increase the energy efficiency of wall enclosures. *Vestnik MGSU*. 2017;12(11):1269–1277. (In Russ.). EDN: TAUMWV.

4. Yokubova M.T. The role of heat containing walls in increasing the energy efficiency of buildings. *Scientific progress*. 2022;3(4):85-88.
5. Gnezdilova O., Kudryavtseva V., Terenteva N. Modern effective technologies applied for constructing external walls. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;828(1):012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/828/1/012008>.
6. Khatina E.V. Dynamic thermal insulation of enclosing structures of buildings. *Polzunovskiy vestnik*. 2011;1:224-228. (In Russ.). EDN: OCSKIR.
7. Vatolkin S.M. Effect of insulation types on the quality of multilayer building structures. *Proektirovanie i stroitel'stvo v Sibiri*. 2003;1:22-24. (In Russ.).
8. Emelianova N.A. Studying technological aspects of cast thermal insulant application in building envelopes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk state technical university*. 2014;12:116-120. EDN: RHIBPE.
9. Moskvitin V.A., Emelyanova N.A., Mashovich A.Y. Experimental studies of air permeability indicators of composite "Poroplast CF". *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2019;9(2):342-353. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-2-342-353>. EDN: XCGLQU.
10. Moskvitin V.A., Pinus B.I., Emelianova N.A., Moskvitin D.V. Longevity of layered frame structures with cast aggregates. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2015;4:151-158. EDN: VHDRGF.
11. Sakmarova L.A., Bakhmisova M.A. Multilayer barrier constructions, and their properties under temperature impact. In: *Novoe v arkhitekture, proektirovanii stroitel'nykh konstruktiv i rekonstruktsii: materialy IV Mezhdunarodnoi (X Vserossiiskoi) konferentsii = New in architecture, design of building structures and reconstruction: materials of the IV International (X All-Russian) conference*. 21-22 November 2018, Cheboksary. Cheboksary: Chuvash State University named after I.N. Ulyanova; 2018. p. 88-96.
12. Tojiboyev B.T. Development of thermal insulation materials with low thermal conductivity on the basis of local raw materials. *Scientific progress*. 2021;2(8):340-345.
13. Mokhammed A.R., Naimi S. The Effectiveness of Thermal Insulation of the Exterior Composite Walls of Buildings in Iraq Based on Different Materials and Climate Regions using Engineering Applications. *International Journal of Intelligent Systems and Application in Engineering*. 2023;11(4s):594-601.
14. Sigachev N.P. Calculation of non-stationary thermal processes taking into account air exchange and the problem of rationing the thermal protection of buildings // *Express-Information. Series Construction, design*. 2001. No. 1. pp. 23-33.
15. Silaenkov E.S. Method for determining the durability of the system of insulation of external walls with an effective insulation // *Stroitelnye materialy*. 2001. No. 1. pp. 15-17.
16. Rhee-Duverne S., McCaig I., Orr S., Zhang H., Viles H.A. Assessing moisture in porous traditional building materials. *1st International Conference on Moisture in Buildings 2021 (ICMB21)*. 28-29 June 2021, London. London: UCL; 2021. <https://doi.org/10.14293/ICMB210054>.
17. Kheifets L.I., Neimark A.V. Multiphase processes in porous media. Moscow: Khimiya; 1982. 320 p. (In Russ.).
18. Karnaukhov A.P. Adsorption. Texture of dispersed and porous materials. Novosibirsk: Nauka. Siberian Enterprise of the Russian Academy of Sciences; 1999. 470 p. (In Russ.).
19. Tushina V., Tushin A., Alekperov R. Experimental and theoretical studies of the thermal efficiency of multilayer non-uniform building enclosures. *Journal of Building Engineering*. 2022;45:103439. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103439>. EDN: MIJVR.
20. Gnezdilova O.A. Evaluation of the heat-shielding qualities of the building envelope. *Nauchnoe obozrenie*. 2007;1:55-57. (In Russ.).
21. Criteria for assessing the quality and choice of heat-insulating materials. *Building Technologies*. 2005;2:5-15. (In Russ.).
22. Vatin N.I., Pestryakov I.I., Sultanov Sh.T., Ogidan T., Yarunicheva Y.A., Kiryushina A.P. Water vapour by diffusion and mineral wool thermal insulation materials. *Magazine of Civil Engineering*. 2018;5(81): (In Russ.).
23. Khlevchuk V.R. Bessonov I.V., Rumyantseva I.A., Sigachev N.P. et al. To the question of the stability of foam plastics and fibrous insulation in building envelopes. *Sat. reports: Problems of building thermal physics of microclimate and energy saving systems in buildings*. Moscow: NIISF. 2001. S. 255-258.
24. Gnezdilova O. A. Study of the influence of operational factors on the thermal conductivity of "Poroplast CF02". *Problems and prospects of research, design, construction and operation of railways: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Irkutsk: IrGUPS, 2009. T. 1. P. 169-173.
25. Moskvitin V.A., Pinus B.I., Emelyanova N.A. Efficiency of using cast heaters in low-rise building walling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk state technical university*. 2013;2:110-114. EDN: PWMETR.
26. Moskvitin V.A., Shishkin A.V., Gnezdilova O.A. and others. Efficient layered stone exterior structures with thermal insulation from the "Poroplast

CF02" composite. TU 5741-002-16602333-2006: approval 000 "Foamplast", LLC "Irkut-Invest". Irkutsk. 2006. 16 p.

27. Gnezdilova O.A., Moskvitin V.A. Heat-Energy-Saving Enclosing Structures with Poroplast CF02 Composite Insulation. *Mounting and Special Works in Construction*. 2007;2:2-6.

28. Xu Ch., Li Sh., Zou K. Study of Heat and Moisture Transfer in Internal and External Wall Insulation

Configurations. *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 24.

<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.02.016>.

29. Gagarin V., Kozlov V., Zubarev K. Determination of Maximum Moisture Zone on Enclosing Structures: Sustainable Buildings in Cold Climates. *Cold Climate HVAC*. 2019. p. 925–932. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00662-4_78.

Информация об авторе

Емельянова Наталья Александровна,

старший преподаватель кафедры
строительного производства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: ena6767@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7692-4424>

Information about the author

Natalia A. Emelyanova,

Senior lecturer of the Department
of Construction Production,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: ena6767@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7692-4424>

Вклад автора

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the author

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.03.2023.
Одобрена после рецензирования 24.04.2023.
Принята к публикации 25.04.2023.

Information about the article

The article was submitted 20.03.2023.
Approved after reviewing 24.04.2023.
Accepted for publication 25.04.2023.



Интеграция бережливого производства и BIM-технологий как основа эффективного проектного управления и организации производственных процессов на этапе строительства

Р.Н. Козлов¹, А.В. Пешков²✉

^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. В современном бизнесе наблюдается рост сложности и объема проектов, требующих эффективного управления и планирования производственных процессов. Это вызывает потребность в развитии новых теоретических подходов, способных справиться с вызовами и требованиями к современным проектам. В связи с этим все большее влияние на управление проектами и планирование производственных процессов оказывают современные технологии, такие, как BIM (*Building Information Modeling*), *Lean Construction* и *Agile*. Разработка теоретических подходов, учитывающих новые технологии и методологии их реализации, позволяет организациям использовать имеющийся потенциал для повышения эффективности и достижения лучших результатов. Интеграция цифровых технологий и автоматизации способствует оптимизации процессов производства и сокращению времени выполнения проектов. Например, интеграция бережливого строительства и BIM-технологий является ключевым фактором в достижении эффективного управления проектами и планирования производственных процессов в строительстве. Путем объединения принципов бережливости и применения современных BIM-технологий организации получают возможность повысить производительность труда и оптимизировать использование своих ограниченных ресурсов, включая время, трудовые ресурсы, материалы и финансы. Такая интеграция позволяет улучшить планирование проектов, увеличить прозрачность и точность информации, снизить издержки и риски, а также улучшить коммуникацию и сотрудничество между участниками проекта. Все эти факторы способствуют достижению эффективности и успеха в современных проектах.

Ключевые слова: бережливое строительство, производительность труда, BIM-технологии, информационное моделирование, проектирование, управление строительным процессом

Для цитирования: Козлов Р.Н., Пешков А.В. Интеграция бережливого производства и BIM-технологий как основа эффективного проектного управления и организации производственных процессов на этапе строительства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 271–284. <https://elibrary.ru/tttkej>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-271-284>.

Original article

Integration of lean management and BIM technologies for effective project management and production processes at a construction stage

Roman N. Kozlov¹, Artem V. Peshkov²✉

^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. As modern businesses face increasingly complex and voluminous projects, the need for efficient management and planning of production processes becomes paramount. To meet these challenges, it is necessary to develop new theoretical approaches. In this regard, advanced technologies such as BIM (*Building Information Modeling*), *Lean Construction*, and *Agile* are becoming increasingly powerful for project management and process planning. By combining these technologies and methodologies, companies can use the available potential to increase efficiency and achieve better

outcomes. The integration of digital technology and automation facilitates the optimization of production processes and reduces project time. For example, the integration of lean construction and BIM technologies is a pivotal factor in achieving efficient project management and planning for production processes in the construction industry. By combining lean principles with modern BIM technology, it is possible for companies to increase performance and optimize the use of their limited resources, including time, labor, materials, and capital. This integration leads to improved project planning, enhanced transparency and accuracy of information, cost and risk reduction, as well as better communication and collaboration among project participants. All these factors contribute to the efficiency and success of modern projects.

Keywords: lean construction, labor productivity, BIM technologies, information modeling, design, construction process management

For citation: Kozlov R.N., Peshkov A.V. Integration of lean management and BIM technologies for effective project management and production processes at a construction stage. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2023;13(2):271-284. (In Russ.). <https://elibrary.ru/tttkej>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-271-284>.

ВВЕДЕНИЕ

Цель данной статьи заключается в исследовании возможностей интеграции бережливого строительства и BIM (*Building Information Modeling*) технологий повышения эффективности проектного управления и планирования производственных процессов в строительстве.

Методы исследования: теоретический анализ и обобщение научной литературы, анализ эволюции теорий и методологий управления проектами, сравнение применимости традиционного и гибкого подходов, анализ проблем и примеров внедрения Lean и BIM-технологий на этапе строительства.

Определено, что бережливое строительство способствует сокращению потерь ресурсов, повышению производительности труда и качества проектов. BIM-технологии, в свою очередь, предоставляют возможность виртуального моделирования и координации различных проектных аспектов, что способствует оптимизации планирования и управления производственными процессами.

Интеграция бережливого строительства и BIM-технологий позволяет достичь синергетического эффекта, улучшая процессы проектного управления, снижая затраты, сокращая риски и повышая качество в строительной отрасли.

Рекомендуется дальнейшее исследование в области адаптации и оптимизации интегрированного подхода в различных типах инвестиционно-строительных проектов.

Роль и значение планирования производственных процессов в строительстве

Планирование производственных процессов играет ключевую роль в строительстве, так как оно предоставляет системный подход

к организации и координации всех этапов проекта. Важность планирования производственных процессов в строительстве определяются несколькими факторами [1].

Во-первых, планирование позволяет определить последовательность и продолжительность каждого этапа проекта, что обеспечивает логичное и эффективное выполнение работ, предотвращает перекрытие задач и снижает риск возникновения задержек или конфликтов в ходе строительства.

Во-вторых, планирование производственных процессов позволяет оптимизировать использование ресурсов. Путем определения точного объема и времени необходимых ресурсов, например, материалов, оборудования и трудовых ресурсов. Можно уменьшить излишнюю трату и повысить эффективность их использования.

В-третьих, планирование способствует управлению рисками и предотвращению проблемных ситуаций. Оно позволяет заранее идентифицировать потенциальные проблемы, такие как недостаток ресурсов, технические сложности или непредвиденные обстоятельства, и разработать стратегии и резервные планы для их решения.

Также, планирование производственных процессов обеспечивает своевременную коммуникацию и сотрудничество между различными участниками проекта. Четкое определение задач и сроков выполнения дает участникам эффективно взаимодействовать, обмениваться информацией и выполнять свои действия скоординировано.

В целом, роль планирования производственных процессов в строительстве заключается в обеспечении структурированного и

систематического подхода к управлению проектами, оптимизации использования ресурсов, снижении рисков и обеспечении согласованности и эффективности работы всех участников проекта.

Эволюция теорий и методологий управления проектами

Эволюция теорий и методологий управления проектами является результатом постоянного развития практического опыта и научных исследований. Начиная с простых методов и инструментов управления проектами, с течением времени появлялись новые теории и подходы, позволявшие более эффективно управлять проектами и планировать производственные процессы.

Один из ранних подходов к управлению проектами – классический подход, основанный на методе критического пути (*Critical Path Method, CPM*) [2] и методе определения резервов времени [3]. Этот подход акцентировал внимание на управлении временем и последовательности задач и в настоящее время является основой для многих современных методологий управления проектами. В последующие десятилетия развивались и появлялись новые теории и методологии, такие как методология управления проектами по Гарету (*Management by Objectives, MBO*), принципы управления качеством (*Total Quality Management, TQM*), гибкие методы управления проектами (*Agile Project Management*) и др. Они предоставляют новые инструменты и подходы к управлению проектами с учетом изменяющихся требований рынка и технологических возможностей. Современные тенденции в управлении проектами включают использование интегрированных информационных систем, таких как BIM и ERP (*Enterprise Resource Planning*) [4], для улучшения планирования и координации производственных процессов. Эти системы позволяют управлять всеми аспектами проекта, включая ресурсы,

временные рамки, качество и бюджет, в едином централизованном интерфейсе. Это снижает риски ошибок, повышает прозрачность и эффективность управления проектом, а также обеспечивает более точное планирование производственных процессов.

Кроме того, современные тенденции включают активное использование принципов и инструментов бережливого строительства (*Lean Construction*). Бережливое строительство базируется на принципах эффективного использования ресурсов, минимизации отходов и повышении производительности. Применение принципов бережливого строительства в управлении проектами и планировании производственных процессов позволяет сократить издержки, улучшить качество и снизить время выполнения проекта. Эволюция теорий и методологий управления проектами продолжается и в настоящее время. С появлением новых технологий и изменениями в бизнес-окружении появляются новые подходы и инструменты, помогающие компаниям эффективно управлять проектами и планировать производственные процессы. Формирование теоретических подходов к управлению проектами и планированию производственных процессов является непрерывным процессом, направленным на поиск и внедрение новых методов и инструментов. Это необходимо для повышения эффективности управления проектами, сокращения затрат и достижения высокого уровня качества выполненных работ.

Традиционное управление проектами и каскадный подход

Традиционное управление проектами и каскадный подход представляют собой один из основных подходов к управлению проектами, который использовался на протяжении многих лет [5]. В этом подходе проект разбивается на последовательные фазы, каждая из которых зависит от успешного завершения предыдущей фазы (рис. 1).



Рис. 1. Традиционное управление проектами
Fig. 1. Traditional project management

Традиционное управление проектами, также известное как «водопадная» модель, предполагает линейное выполнение этапов проекта, начиная с определения требований и заканчивая завершением проекта и его сдачей заказчику. Каждая фаза имеет определенные результаты и осуществляется последовательно.

Каскадный подход основывается на идее, что все требования и детали проекта должны быть определены и утверждены в начале проекта. Затем проект выполняется шаг за шагом в строго определенной последовательности. Этот подход предполагает жесткую структуру и планирование, а также строгое соблюдение предопределенных сроков и бюджета.

Однако традиционное управление проектами и каскадный подход имеют свои ограничения. Они предполагают, что все требования и детали проекта могут быть определены заранее, что не всегда является реалистичным. Кроме того, жесткая структура и последовательность этапов могут затруднить адаптацию к изменениям в проекте или изменению требований заказчика.

В современном управлении проектами все

большее внимание уделяется гибким методологиям, таким как Agile, Scrum и Lean, и принципу синхронизации интересов участников проекта [6]. Эти подходы позволяют более гибко реагировать на изменения и требования заказчика, а также активно вовлекать заинтересованные стороны в процесс принятия решений.

Разработка гибких методологий и их влияние на управление проектами

Разработка гибких методологий и их влияние на управление проектами представляют собой значительную эволюцию в области управления проектами. Гибкие методологии, такие как Agile, Lean и другие, были разработаны с целью обеспечить более гибкое, адаптивное и эффективное управление проектами [7].

Одним из ключевых принципов гибких методологий является итеративный и инкрементальный подход к выполнению проекта. Вместо того чтобы разбивать проект на жесткие фазы и последовательные шаги, гибкие методологии предлагают работать в коротких циклах, называемых спринтами или итерациями. Каждый спринт фокусируется на выполнении определенного объема работы и приводит к конкретным достижениям (рис. 2).

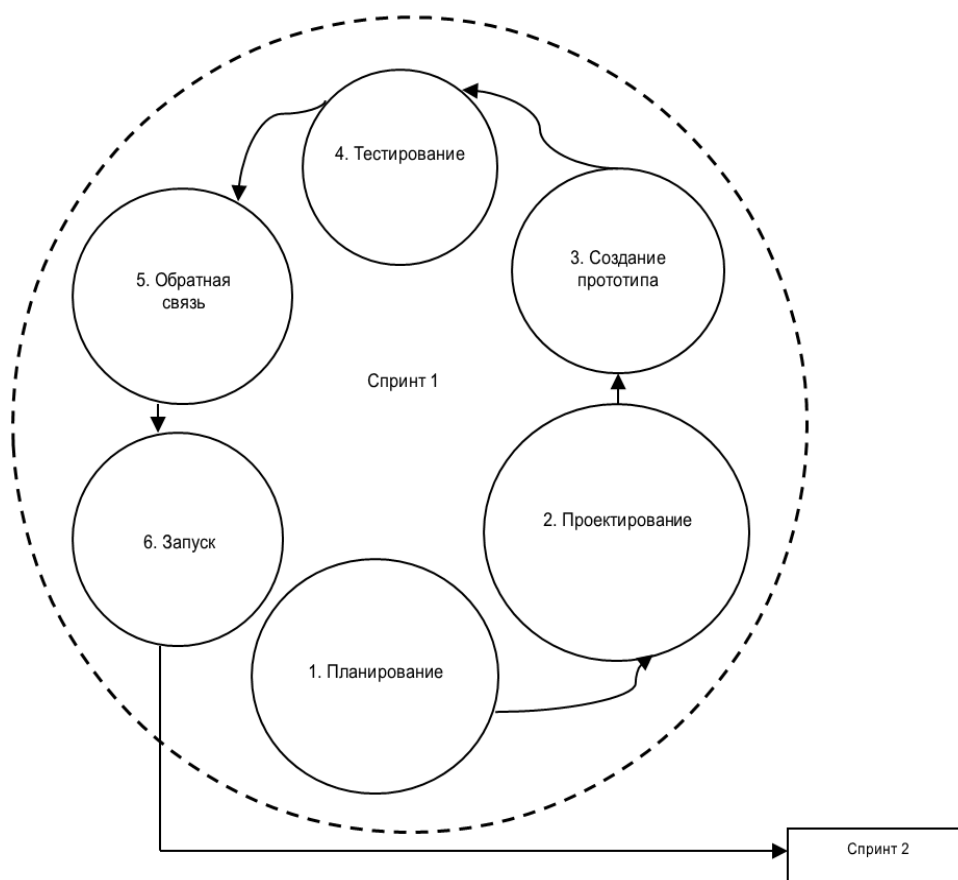


Рис. 2. Гибкие методологии
Fig. 2. Flexible methodologies

Гибкие методологии также ставят упор на вовлечение заинтересованных сторон в процесс управления проектом. Они активно взаимодействуют с заказчиком и другими участниками проекта, чтобы понять их требования и ожидания, а также принимать быстрые решения на основе обратной связи.

Гибкие методологии также признают, что требования и условия проекта могут меняться со временем. Вместо попытки заранее определить все требования, гибкие методологии предлагают гибкий и итеративный подход, позволяющий адаптироваться к изменениям и вносить коррективы в процессе выполнения проекта.

Влияние гибких методологий на управление проектами проявляется в нескольких аспектах. Во-первых, они способствуют более быстрой и эффективной доставке продукта или результата проекта, позволяя выполнять работу в более короткие сроки. Во-вторых, гибкие методологии повышают гибкость и адаптивность команды проекта, позволяя быстро реагировать на изменения требований и условий проекта. В-третьих, гибкие методологии стимулируют активное взаимодействие и коммуникацию внутри команды проекта и с заинтересованными сторонами, способствуя более эффективному сотрудничеству и выработке взаимопонимания. В-четвертых, гибкие методологии способствуют повышению качества проекта, так как они обеспечивают регулярную проверку и оценку промежуточных результатов, а также возможность вносить коррективы и улучшения в процессе выполнения проекта.

Гибкие методологии также содействуют улучшению управления рисками в проекте. Благодаря итеративному и инкрементальному подходу проблемы и риски могут быть выявлены и решены на ранних этапах проекта, минимизируя их влияние на итоговый результат.

Однако, несмотря на все преимущества гибких методологий, они также имеют свои ограничения и не подходят для всех типов проектов. Например, в проектах, где требуется строгое соблюдение бюджета и графика, традиционные подходы могут быть более подходящими. Кроме того, гибкие методологии требуют активного участия и открытой коммуникации со стороны всех участников проекта, что может быть вызовом в некоторых организационных и культурных контекстах.

Разработка явных и нелинейных теорий управления проектами для лучшей адаптации структуры

В рамках современной парадигмы управления проектами возникает необходимость

разработки явных и нелинейных теорий, которые позволят более эффективно адаптировать структуру управления проектами к динамической и неопределенной среде. Рассмотрим ключевые аспекты разработки таких теорий и их влияние на управление проектами.

1. Учет нелинейности. Явные и нелинейные теории управления проектами принимают во внимание нелинейные взаимосвязи и взаимодействия внутри проекта. Они осознают, что изменение в одной области проекта может привести к неожиданным эффектам и изменениям в других областях. Подходы, такие как *Agile* и *Scrum*, акцентируют внимание на итеративности, инкрементальности и способности быстро реагировать на изменения [8].

2. Адаптивность и гибкость. Разработка явных и нелинейных теорий управления проектами направлена на создание более адаптивных и гибких структур управления. Эти теории предлагают методы и подходы, которые позволяют быстро адаптироваться к изменениям в проекте и внешней среде. Например, методологии гибкого управления проектами предоставляют рамки для эффективной коммуникации, сотрудничества и принятия решений в условиях неопределенности.

3. Интеграция функциональных областей. Разработка явных и нелинейных теорий управления проектами стремится к более тесной интеграции различных функциональных областей и участников проекта. Это позволяет снизить риск возникновения проблем при взаимодействии и повысить эффективность работы команды проекта. Например, методология интегрированного управления проектами (*Integrated Project Management*) обеспечивает совместную работу между различными функциональными группами, чтобы достичь общих целей проекта.

4. Учет контекстуальных факторов. Явные и нелинейные теории управления проектами так же учитывают контекстуальные факторы проекта. Они признают, что каждый проект имеет свои особенности, цели, ограничения и внешнюю среду, которые необходимо учитывать при разработке и применении управленческих подходов. Это позволяет создавать более точные и адаптированные модели управления проектами, которые удовлетворяют конкретным требованиям проекта.

5. Инновационный подход. Разработка явных и нелинейных теорий управления проектами способствует стимулированию инноваций и творчества в проектных командах. Они пропагандируют гибкие методы работы, способствующие появлению новых идей, экспериментированию и постоянному улучшению.

Применение таких подходов, как *Design Thinking* или *Lean Startup*, позволяет активно включать команду проекта в процесс итеративного и инновационного развития.

Разработка явных и нелинейных теорий управления проектами открывает новые горизонты для эффективного управления проектами в современных динамических и неопределенных условиях. Они предоставляют более гибкие, адаптивные и инновационные подходы, способствующие лучшей адаптации структуры управления к особенностям каждого проекта.

Сравнение применимости традиционного и гибкого подходов в различных производственных сценариях

Традиционный подход к управлению проектами основывается на жестком планировании и последовательном выполнении проекта (таблица). Он обычно включает в себя определение всех задач и этапов проекта заранее, разделение работы на подзадачи, создание иерархической структуры команды, а также применение линейных моделей и методов управления, таких как каскадная модель.

В традиционном подходе основное внимание уделяется контролю сроков, бюджета и

выполнению задач по плану.

Гибкий подход к управлению проектами ориентирован на адаптивность, итеративность и способность быстро реагировать на изменения (таблица).

В гибком подходе основное внимание уделяется сотрудничеству, коммуникации и гибкости в планировании и выполнении проекта. Он подразумевает непрерывную коммуникацию с заказчиком, активное вовлечение команды проекта в процесс принятия решений, а также использование гибких методологий, таких как *Scrum*, *Kanban* или *Agile*, которые позволяют быстро адаптироваться к изменениям требований и внешней среды [9, 10].

Традиционный подход ориентирован на строгий контроль и планирование, с фокусом на выполнении задач по заранее определенному плану. Он предполагает предварительное определение требований и спецификаций проекта, а также строгое следование последовательности этапов. Гибкий подход, напротив, подразумевает гибкость и адаптивность в выполнении проекта. Он основан на итеративности, постоянной коммуникации и способности быстро реагировать на изменения и новые требования.

Сравнение подходов Comparison of approaches

Традиционный подход	Жесткое планирование и последовательное выполнение проекта	Обычно лучше применим в сценариях с четкими и стабильными требованиями, когда задачи и их последовательность могут быть четко определены заранее
Гибкий подход	Адаптивность, итеративность и способность быстро реагировать на изменения	Предпочтителен в сценариях с изменчивыми требованиями, высокой степенью неопределенности и быстро меняющейся внешней средой

Важно отметить, что выбор между традиционным и гибким подходом зависит от конкретных особенностей проекта, его целей, рисков и контекста. Некоторые проекты могут требовать комбинации обоих подходов, при которой используются элементы традиционного планирования и контроля, а также гибкие методологии для адаптации к изменениям.

Проблемы, связанные с принятием и адаптацией теоретических основ в реальных сценариях

Ряд проблем, с которыми сталкиваются организации при принятии и адаптации теоретических основ управления проектами и планирования производства в реальных сценариях:

1. Сопротивление изменениям. Внедрение новых теоретических подходов может вы-

зывать сопротивление со стороны сотрудников и руководства организации. Это может быть связано с привычкой к существующим методам работы, страхом перед неизвестностью или недостаточным пониманием преимуществ, которые может принести новый подход. Необходимо разработать стратегии коммуникации и обучения, чтобы преодолеть сопротивление и создать понимание и поддержку новых теоретических основ.

2. Недостаток ресурсов. Внедрение и адаптация новых теоретических основ требует времени, финансовых ресурсов и экспертного знания. Организации могут столкнуться с ограничениями в доступных ресурсах, что затрудняет проведение необходимых изменений. Необходимо провести оценку ресурсов и

разработать планы внедрения, учитывая ограничения и эффективное использование доступных ресурсов.

3. Несоответствие культуры организации. Каждая организация имеет свою уникальную корпоративную культуру и стиль управления. Внедрение новых теоретических подходов может потребовать изменения культурных аспектов, что может вызвать сопротивление и проблемы. Важно анализировать существующую культуру организации, определять соответствие новым подходам и при необходимости внедрять изменения постепенно, с учетом особенностей культуры.

4. Сложность интеграции с существующими системами и процессами. Организации часто уже имеют установленные системы и процессы управления проектами и планирования производства. Внедрение новых теоретических основ может требовать интеграции существующих систем и процессов, что может оказаться сложной задачей. Различные системы могут иметь разные структуры данных, форматы отчетности и методы анализа. Интеграция новых теоретических основ с существующими системами и процессами может потребовать дополнительной работы по адаптации, обновлению или замене систем [11]. Это может включать настройку программного обеспечения, обучение сотрудников и обновление рабочих процессов. Необходимо провести тщательный анализ существующих систем и процессов, чтобы определить необходимые изменения и планировать их внедрение.

5. Недостаток экспертизы и опыта. Внедрение новых теоретических основ может потребовать специализированной экспертизы и опыта, которые могут отсутствовать в организации.

Недостаток квалифицированных сотрудников или специалистов может затруднить успешное принятие и адаптацию новых подходов. В таких случаях организации могут обратиться к внешним консультантам или провести внутреннее обучение и развитие персонала, чтобы заполнить пробелы в экспертизе.

Все эти проблемы могут встречаться при принятии и адаптации теоретических основ управления проектами и планирования производства в реальных сценариях. Важно учитывать эти проблемы при разработке стратегий и планов внедрения, а также обеспечивать поддержку и обучение сотрудников для успешной адаптации новых подходов.

BIM-технологии в строительстве

В настоящее время, строительная отрасль сталкивается с необходимостью ускорения процессов и оптимизации затрат. В этом кон-

тексте, технология BIM становится все более популярной в бережливом строительстве. Технология BIM (*Building Information Modeling*) – это метод проектирования, строительства и эксплуатации объектов инфраструктуры, основанный на использовании цифровых моделей зданий и сооружений.

При оценке выгод, которые технология может принести организации, выделяют следующие пункты [12, 13]:

- возможность создания виртуальной модели здания;
- установка индивидуальных параметров объекта;
- получение высококачественной проектной документации;
- быстрое обнаружение и устранение ошибок и неточностей через изменение параметров;
- экспериментирование с моделью в разных условиях;
- управление и контроль строительства объекта на всех этапах;
- использование информационной модели разными организациями;
- выполнение ремонта и реконструкции объекта с учетом требований эксплуатации.

Благодаря использованию BIM-технологий, различные участники проекта могут работать над одной и той же версией модели, обмениваясь информацией и координируя свои действия, что позволяет улучшить процесс взаимодействия между различными участниками проекта и снизить вероятность ошибок.

В целом, BIM-технологии являются одним из наиболее перспективных направлений в области проектирования и строительства, позволяющим улучшить качество проектирования и строительства, сократить затраты на строительство и эксплуатацию объектов и повысить эффективность использования имеющихся ресурсов.

Проблемы внедрения BIM-технологий

В работе [14] отмечается, что в Йемене замедляется развитие BIM-технологий из-за ограничений в финансировании, нехватки знаний и неумения персонала, неправильного использования потенциала BIM, а также отсутствия государственной поддержки [15].

В статье [16] говорится о том, что в России выявлено две главные проблемы внедрения BIM-технологий. Первая проблема заключается в том, что российские строительные компании не проявляют достаточного интереса к реализации этой технологии. Вторая проблема связана с отсутствием единых правил для оформления проектной и рабочей документации в соответствии с нормативными докумен-

тами (ГОСТ, СПДС).

С.Г. Абрамян и другие исследователи [17] выделили несколько проблем внедрения BIM-технологий в России. К ним относятся отсутствие полного набора нормативных документов, низкий интерес и недостаточная информированность строительных организаций, высокая стоимость внедрения и сложность совместимости с другими компьютерными технологиями, финансовые ограничения, трудоемкость создания BIM-модели и нехватка знаний и компетентности персонала.

Н.А. Козлов и К.А. Попова [18] также выделяют проблемы, связанные с привлечением молодых специалистов, необходимостью модернизации существующей системы, переобучением сотрудников, дороговизной программного обеспечения и временным снижением работоспособности.

Одна из основных проблем применения BIM-технологий заключается в необходимости изменения существующих рабочих процессов и подготовке персонала к работе в новых условиях. Требуется обучение специалистов работе с новыми программными средствами и методами проектирования и строительства [19]. Кроме того, использование BIM-технологий требует значительных инвестиций в программное обеспечение и оборудование. Некоторые компании могут не быть готовы к таким затратам. Еще одной проблемой [20] является необходимость установления единых стандартов для работы с BIM-моделями, что может вызвать затруднения при совместной работе различных участников проекта.

По мнению М.И. Сергеевой [21], существует недостаточное количество предметов, связанных с современными технологиями в строительстве, которые преподаются в высших учебных заведениях. Она также подчеркивает, что большинство проектировщиков не заинтересованы во внедрении новых технологий и материалов.

Бережливое строительство

Концепция менеджмента, известная как бережливое производство, заключается в стремлении к устранению любых потерь в производственном процессе. Эта концепция включает в себя участие каждого сотрудника в оптимизации бизнеса и ориентацию на потребности потребителя. Бережливое производство применяется многими компаниями в различных отраслях и в разных странах [22].

Процесс строительных работ в бережливом строительстве отличается от традиционного процесса строительства. Основные принципы бережливого строительства — это

максимизация добавленной стоимости и минимизация потерь. Это достигается за счет следующих этапов и принципов [23, 24]:

1. Планирование процесса строительства: в бережливом строительстве особое внимание уделяется планированию. Каждый этап процесса должен быть подробно проработан заранее, определены его сроки и ресурсы, а также способы сокращения потерь. Для этого используются методы Lean-планирования, такие как *Last Planner System* и *Pull Planning*.

2. Сокращение потерь: бережливое строительство предполагает минимизацию потерь на всех этапах строительства. В качестве потерь выступают любые ненужные операции, движения, ожидания и простои. Для сокращения потерь применяются методы Lean-производства, такие как 5S, *Kaizen*, *Value Stream Mapping* и пр.

3. Использование BIM: использование BIM-технологий помогает уменьшить потери и повысить эффективность работы команды строителей. BIM-модель позволяет совершенствовать проект и управлять процессом строительства.

4. Работа в команде: в бережливом строительстве особое внимание уделяется работе в команде. Каждый участник команды должен знать свою роль и задачи, а также уметь взаимодействовать с другими участниками процесса. Работа в команде позволяет повысить эффективность и снизить потери на всех этапах процесса строительства.

5. Контроль и улучшение процесса: бережливое строительство предполагает постоянный контроль и улучшение процесса. Для этого используются методы Lean-производства, такие как PDCA-цикл, DMAIC и др.

Таким образом, процесс строительных работ в бережливом строительстве отличается тщательным планированием, сокращением потерь, использованием BIM-технологий, работой в команде и постоянным контролем и улучшением процесса.

Проблемы внедрения концепции бережливых технологий

Профессор Т. Нетланд, исследуя проблемы, связанные с внедрением бережливых технологий в компаниях, выделил три главных фактора успеха, которые он обозначил как «три L»: лидерство (*Leadership*), долгосрочный фокус (*Long-term focus*) и обучение (*Learning*). Следовательно, для успешной реализации бережливых технологий в организации необходимо обеспечить эффективное и непрерывное повышение квалификации со-

трудников [25].

В работе Е.Н. Дыриной [26] подчеркивается, что российские компании сталкиваются с серьезными трудностями при внедрении принципов бережливого производства, что обусловлено несколькими причинами, такими как отсутствие у специалистов, занимающихся преобразованием к бережливому производству, глубокого понимания методологии, неадаптированность методологии к особенностям конкретной организации, отсутствие системного подхода к преобразованиям, формальность проекта с формальными целями и результатами, отсутствие специальных знаний и навыков, отсутствие заинтересованности собственников и топ-менеджеров, сложность понимания всей архитектуры системы бережливого производства и сопротивление изменениям со стороны сотрудников из-за страха несоответствия новым требованиям и нежелания повышать нагрузки при сохранении прежней заработной платы. Также отмечается недостаточный интерес со стороны сотрудников, как отмечает К.Е. Мельникова [27].

Примеры успешных практик интеграции BIM-технологий и бережливого строительства

В статье [28] А.В. Казаринов, В.П. Куприяновский и В.В. Талапов рассматривают международный опыт BIM-технологий применительно к жизненному циклу объектов железнодорожной инфраструктуры. Так в проекте *Crossrail* с реализацией BIM отмечают следующие преимущества:

- Совместное управление всеми типами данных.
- Улучшенная производительность (связывание моделей с картографированием через ГИС).
- Интеграция данных для всех этапов жизненного цикла и др.

Для проекта *High Speed 2* в Великобритании BIM-моделирование является ключевым фактором, поэтому особое внимание уделяется прикладным исследованиям применения BIM технологий.

ООО «Газпром ВНИИГАЗ» использует информационно-ситуационную карту (ИСК, ISC), которая описывает траекторию плана действий и помогает обеспечить ее интерактивное выполнение в меняющихся условиях [29].

Примером успешного применения принципов бережливого строительства в Германии можно назвать Эльбфилармонию в Гамбурге, которая является ярким примером. В ходе этого проекта возникли проблемы, связанные с перерасходом средств и задержками. Однако благодаря применению принципов береж-

ливости ситуация была изменена. Проект использовал совместный подход и постоянное стремление к улучшению, что помогло достичь правильного курса и завершить строительство в срок и в рамках бюджета.

Жилой комплекс «Полянка/44» в г. Москве отличается использованием передовых технологий и материалов, таких как панели с утеплителем из минеральной ваты, двухкамерные стеклопакеты с низкоэмиссионным покрытием, водосберегающие краны и другие инновации. В результате этих мер удалось снизить затраты на коммунальные услуги и повысить уровень комфорта для жильцов.

Офисный комплекс «Башня Федерации» в г. Москве является еще одним проектом, основанным на принципах бережливости. В процессе строительства были использованы экологически чистые материалы, такие как стекло с низкоэмиссионным покрытием, вентиляционные системы с рекуперацией тепла, энергоэффективные системы освещения и другие инновации. Благодаря этому удалось снизить энергопотребление на 40% по сравнению с аналогичными зданиями [30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что гибкие методологии нашли применение в строительстве вместе с развитием информационных технологий, таких как BIM, который позволяет создавать виртуальные модели зданий и инфраструктуры, интегрировать данные и обеспечивать совместное управление ими всеми заинтересованными сторонами. Это помогает улучшить координацию, снизить ошибки и конфликты, а также повысить эффективность и качество проекта.

Принципы бережливого строительства также нашли широкое применение в планировании производственных процессов в строительстве. Они направлены на максимизацию добавленной стоимости и минимизацию потерь. Бережливое строительство стремится устранить ненужные операции, сократить время выполнения задач, улучшить качество и снизить издержки. Оно предлагает методы, такие как *Last Planner System*, *Pull Planning* и *Value Stream Mapping*, которые помогают повысить эффективность планирования, снизить потери и улучшить управление проектами.

В международном опыте с интеграцией BIM-технологий и принципов бережливого строительства были реализованы успешные проекты, такие как Эльбфилармония в Гамбурге, «Полянка/44» в Москве и «Башня Федерации» в Москве. Эти проекты демонстрируют преимущества использования современных методов планирования и управления, та-

ких как интеграция данных, совместное управление и активное участие всех участников проекта. По результатам исследования можно сделать вывод, что планирование в строительстве должно включать в себя применение современных методологий управления проектами, таких как *Agile* и *Lean*, а также использование информационных технологий, включая BIM. Эти подходы помогают повысить эффективность, снизить риски и улучшить качество на этапе строительства.

Таким образом, интеграция BIM-технологий и принципов бережливого строительства как основ эффективного управления и планирования позволяют суще-

ственно повысить эффективность и качество строительного процесса, сократить затраты на проектирование, строительство и эксплуатацию объектов, а также уменьшить вероятность ошибок и несоответствий. Кроме того, обучение персонала данным методам и технологиям является важным фактором для успешной реализации проектов в строительстве.

Дальнейшие исследования в данной области позволяют разработать новые методы и инструментов, адаптировать бережливый подход и BIM-технологии под специфику строительной отрасли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аюпова Г.М. Пути улучшения процесса планирования производственной деятельности предприятия // Молодежь и XXI век – 2018: материалы VIII Междунар. молодежной науч. конф. (г. Курск, 21–22 февраля 2018 г.). В 5-ти т. Т. 1. Курск: Университетская книга, 2018. С. 20–23. EDN: YSNNPC.
2. Радковская Е.В. Применение метода критического пути в управлении производственными процессами // Глобальный научный потенциал. 2018. № 9 (90). С. 66–68. EDN: YLZOXJ.
3. Огородникова Т.С. Резервы использования рабочего времени и повышения производительности труда рабочих промышленного предприятия // Human Progress. 2017. Т. 3. № 12. С. 1. EDN: YUTJNI.
4. Иванов В.В., Черкасов Д.Ю. Enterprise Resource Planning // Аллея науки. 2018. Т. 1. № 4 (20). С. 600–604. EDN: XOHNGH.
5. Смирнов В.А. Традиционный и сетевой методы управления в проектах // Философия: материалы 54-й Междунар. науч. студ. конф. МНСК-2016 (г. Новосибирск, 16–20 апреля 2016 г.). Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2016. С. 37–38. EDN: OULTMX.
6. Матвеева М.В. Синхронизация деятельности участников реализации инвестиционно-строительных проектов в жилищном строительстве // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2018. Т. 8. № 2 (25). С. 31–41. EDN: XRTQNN. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2018-2-31-41>.
7. Чуланова О.Л. Технология управления проектами и проектными командами на основе методологии гибкого управления проектами Agile // Вестник евразийской науки. 2018. Т. 10. № 1. С. 37. EDN: XNHVZB.
8. Лозгачева Т.М., Табекина О.А., Федотова

- О.В. Agile и научная организация труда: практика применения гибких методов в России // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Экономика и управление. 2019. Т. 5. № 2. С. 48–59. EDN: OCMGEV.
9. Сафонов А.А. Управление проектами с помощью гибких подходов // Вектор экономики. 2019. № 1 (31). С. 22. EDN: ZPOXXZ.
10. Лысенко О.А., Савин А.Г. Методы управления проектами. Гибкий Agile подход // XV Королёвские чтения: материалы Междунар. молодежной науч. конф., посвященной 100-летию со дня рождения Д.И. Козлова (г. Самара, 08–10 октября 2019 г.). Т. 2. Самара: Автономная некоммерческая организация «Изд-во Самарского Научного Центра», 2019. С. 696. EDN: CCZMGS.
11. Матвеева М.В. Генезис управленческих концепций управления расширенным производством // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2014. № 6 (11). С. 30–39. EDN: THNUDH.
12. Дронов Д.С., Киметова Н.Р., Ткаченко В.П. Проблемы внедрения BIM-технологий в России // Синергия Наук. 2017. № 10. С. 529–549. EDN: YLPAZJ.
13. Пешков А.В., Матвеева М.В., Безруких О.А., Рогов Д.С. Обеспечение процессов контроля качества на всех этапах жизненного цикла объектов капитального строительства в рамках концепции «Строительство 4.0» // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 1. С. 90–97. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-1-90-97>. EDN: AIHCLW.
14. Gamil Y., Rahman I.A.R. Awareness and challenges of building information modelling (BIM) in the Yemen construction-industry // Journal of Engineering Design and Technology. 2019. Vol. 17. Iss. 5. P. 1077–1084.

15. Мальцев В.Л. Из опыта решения проблем внедрения BIM-технологий // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 29–30 марта 2018 г.). СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. С. 35–40. EDN: YUMGUL.
16. Шеина С.Г., Петров К.С., Федоров А.А. Исследование этапов развития BIM – технологий в мировой практике и России // Строительство и техногенная безопасность. 2019. № 14 (66). С. 7–14. EDN: QJNHWP.
17. Абрамян С.Г., Котляревская А.В., Оганесян О.В., Бурлаченко О.В., Дикмеджян А.А. Проблемы внедрения BIM-технологий в строительном секторе: обзор научных публикаций // Инженерный вестник Дона. 2019. № 9 (60). С. 4. EDN: NWCABR.
18. Козлов Н.А., Попова К.А. Проблемы внедрения технологий BIM-проектирования в России // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2016. № 1 (15). С. 18–21. EDN: VSEXRL.
19. Семенов А.А. Интеграция концепции BIM в учебный процесс строительных вузов // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 29–30 марта 2018 г.). СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. С. 207–211. EDN: YVCXVU.
20. Величко Г.В. Прикладные аспекты проблем эффективности BIM-технологий объектов автотранспортной инфраструктуры // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2019. Т. 2. № 86. С. 173–183. EDN: BJOKCH. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2019.86.2.173>.
21. Сергеева М.И. Проблемы внедрения современных технологий в строительство // Научный электронный журнал «Меридиан». 2019. № 13 (31). С. 87–89. EDN: FDWKPU.
22. Давыдова Н.С. Бережливое производство. Ижевск: Удмуртский государственный университет, 2012. 135 с. EDN: QVKLSD.
23. Жусуева Н.Ж. Системы электронного документооборота комплексной автоматизации организаций // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2019. № 4 (52). С. 82–88. EDN: JRKBOW.
24. Чернов В.Д., Ахмедова М.Р., Поддубная М.Н. Проектный подход к разработке и внедрению систем менеджмента качества // Экономика и бизнес: теория и практика. 2020. № 12-3 (70). С. 198–201. <https://doi.org/10.24411/2411-0450-2020-11159>.
25. Нетланд Т. Те, кто ожидает быстрой отдачи от бережливого производства, будут разочарованы // «Умные производственные системы»: X Междунар. юбилейный саммит. URL: [https://cup-russia.ru/2019/03/netland/\(04.01.2023\)](https://cup-russia.ru/2019/03/netland/(04.01.2023)).
26. Дырина Е.Н. Проблемы при внедрении инструментов бережливого производства в российских предприятиях // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2014. № 1 (4). С. 225–228. EDN: TFNFXJ.
27. Мельникова К.Е. Проблемы управления персоналом при внедрении инструментов бережливого производства на промышленном предприятии // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. творческой молодежи (г. Красноярск, 10–14 апреля 2017 г.). Красноярск: Сибирский государственный университет имени академика М.Ф. Решетнева, 2017. Т. 3. № 13. С. 827–829. EDN: YQWCAA.
28. Казаринов А.В., Куприяновский В.П., Талапов В.В. Международный опыт и тенденции развития технологии информационного моделирования применительно к жизненному циклу объектов железнодорожной инфраструктуры // International Journal of Open Information Technologies. 2020. Т. 8. № 12. С. 94–112. EDN: ADAOXK.
29. Снежин А.Н. ИСК-технология планирования действий интеллектуального агента // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. (г. Воронеж, 18–20 декабря 2017 г.). Воронеж: Изд-во «Научно-исследовательские публикации»; ООО «Вэлборн», 2017. С. 314–318. EDN: YRQADZ.
30. Евстигнеева С., Аразов Н. Бережливое строительство: максимизация ценности и минимизация отходов // German International Journal of Modern Science. 2023. No. 52. P. 16–19. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7747158>.

REFERENCES

1. Ayupova G.M. Ways to improve the process of planning the production activity of the enterprise. *Molodezh' i XXI vek – 2018: materialy VIII Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii. T. 1. = Youth and the XXI century - 2018: Materials of the VIII International Youth Scientific Conference.*

Vol. 1. 21-22 February 2018, Kursk. Kursk: Universitetskaya kniga, 2018. p. 20-23. (In Russ.). EDN: YSNNPC.

2. Radkovskaya E.V. Application of the critical path method in the management of production process-

es. *Global'nyi nauchnyi potentsial = Global scientific potential*. 2018;9:66-68. (In Russ.). EDN: YLZOXJ.

3. Ogorodnikova T. S. Reserves of using working time and increasing labor productivity of workers of an industrial enterprise. *Human Progress*. 2017;3(12):1. (In Russ.). EDN: YUTJNI.

4. Ivanov V.V., Cherkasov D.Y. Enterprise Resource Planning. *Alley of Science = Alleya nauki*. 2018;1(4):600-604. (In Russ.). EDN: XOHNGH.

5. Smirnov V.A. Traditional and network management methods in projects. In: *Filosofiya: materialy 54-i Mezhdunarodnoi nauchnoi studencheskoi konferentsii MNSK-2016 = Philosophy: Materials of the 54th International Scientific Student Conference MNSC-2016*. 16-20 April 2016, Novosibirsk. Novosibirsk: Novosibirsk National Research State University; 2016. p. 37-38. EDN: OULTMX.

6. Matveeva M.V. Synchronization of the activity of participants during the implementation of housing construction projects. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2018;8(2):31-41. (In Russ.). EDN: XRTQNN. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2018-2-31-41>.

7. Chulanova O.L. Technology of project management and project teams based on Agile flexible project management methodology. *Vestnik evraziiskoi nauki = The Eurasian Scientific Journal*. 2018;10(1):37. (In Russ.). EDN: XNHVZB.

8. Lozgacheva T.M., Tabekina O.A., Fedotova O.V. Agile and the scientific organization of labor: the practice of applying agile methods in Russia. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Ekonomika i upravlenie*. 2019;5(2):48-59. (In Russ.). EDN: OCMGEV.

9. Safonov A.A. Management of projects with the help of flexible approaches. *Vektor ekonomiki*. 2019;1(31):22. (In Russ.). EDN: ZPOXXZ.

10. Lysenko O.A. Project management methods. Flexible Agile approach. In: *XV Korolevskie chteniya: materialy Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya D.I. Kozlova = "XV Korolev Readings": International Youth Scientific Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of D.I. Kozlov*. 08-10 October 2019, Samara. Vol. 2. Samara: Autonomous non-profit organization "PH of the Samara Scientific Center"; 2019: p. 696. (In Russ.). EDN: CCZMGS.

11. Matveeva M.V. Origin of administrative concepts in the management of wide reproduction. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2014;6(11):30-39. (In Russ.). EDN: THNUDH.

12. Dronov D.S. Problems of introduction of BIM-technologies in Russia. *Sinergiya nauk*. 2017;10:529-549. (In Russ.). EDN: YLPAZJ.

13. Peshkov A.V., Matveeva M.V., Bezrukh O.A., Rogov D.S. Ensuring quality control processes at

all stages of the life cycle of capital construction projects under the Construction 4.0 concept. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2022;12(1):90-97. (In Russ.). EDN: AIHCLW. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-1-90-97>.

14. Gamil Y., Rahman I.A.R. Awareness and challenges of building information modelling (BIM) in the Yemen construction-industry. *Journal of Engineering Design and Technology*. 2019;17(5):1077-1084. <https://doi.org/10.1108/JEDT-03-2019-0063>.

15. Maltsev V.L. From experience of the problems of implementation of BIM technologies. In: *BIM-modelirovanie v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = BIM-modeling in construction and architecture tasks: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. 29-30 March 2018, Saint Petersburg. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2018. p. 35-40. (In Russ.). EDN: YUMGUL.

16. Sheina S.G., Petrov K.S., Fedorov A.A. Research of the stages of development of BIM-technologies in world practice and Russia. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and industrial safety*. 2019;14:7-14. (In Russ.). EDN: QJNHWP.

17. Abrahamyan S.G., Kotlyarevskaya A.V., Oganessian O.V., Burlachenko O.V., Dikmedzhyan A.A. Problems of implementing BIM-technologies in the construction sector: overview of scientific publications. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering journal of Don*. 2019;9:4. (In Russ.). EDN: NWCABR.

18. Kozlov N.A., Popova K.A. Problems of introduction of the BIM-technologies of design in Russia. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve*. 2016;1:18-21. (In Russ.). EDN: VSEXRL.

19. Semenov A.A. Integration of the BIM concept into the educational process of construction universities. In: *BIM-modelirovanie v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = BIM-modeling in the tasks of construction and architecture: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. 29-30 March 2018, Saint Petersburg. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2018. p. 207-211. (In Russ.). EDN: YVCXVU.

20. Velichko G.V. Applied aspects of problems with efficiency of bim technologies of motor transport infrastructure objects. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta = Bulletin of Kharkov national automobile and highway university*. 2019;2(86):173-183. (In Russ.). EDN: BJOKCH. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2019.86.2.173>.

21. Sergeeva M.I. Problems of introduction of mod-

ern technology in construction. *Nauchnyi elektronnyi zhurnal "Meridian"*. 2019;13:87-89. (In Russ.). EDN: FDWKPU.

22. Davydova N.S. Lean manufacturing. Izhevsk: Udmurt State University; 2012. 135 p. (In Russ.). EDN: QVKLSD.

23. Zhusueva N.Zh. Electronic document management systems for complex automation of organizations. *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova*. 2019;4:82-88. (In Russ.). EDN: JRKBOW.

24. Chernov V.D., Akhmedova M.R., Poddubnaya M.N. Project approach to the development and implementation of quality management systems. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika = Journal of Economy and Business*. 2020;12-3:198-201. (In Russ.).

25. Netland T. Those who expect quick returns from lean manufacturing will be disappointed. In: *"Smart Production Systems": Xth International Anniversary Summit*. Available from: <https://cup-russia.ru/2019/03/netland> [Accessed 04th January 2023]. (In Russ.).

26. Dyrina E.N. Problems in the introduction of lean production tools in Russian enterprises. *Innovatsionnaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya*. 2014;1(4):225-228. (In Russ.). EDN: TFNFXJ.

27. Melnikova K.E. Human resource management problems in case of implementation of instruments of economical production at the industrial enter-

prise. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики: materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii tvorcheskoi molodezhi = Actual problems of aviation and cosmonauts: materials of the III interfaith Conference of palace goods*. 10-14 April 2017, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 2017. Vol. 3. No. 13. p. 827-829. EDN: YQWCAA.

28. Kazarinov A.V. International experience and trends in the development of information modeling technology in relation to the life cycle of railway infrastructure facilities. *International Journal of Open Information Technologies*. 2020;8(12):94-112. (In Russ.). EDN: ADAOXK.

29. Snezhin A.N. ISK-technology of planning actions of an intellectual agent. *Aktual'nye problemy prikladnoi matematiki, informatiki i mekhaniki: sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Actual problems of applied mathematics, computer science and mechanics: proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. 18-20 December 2017, Voronezh. Voronezh: PH "Scientific research publications"; LLC "Valborn"; 2017. C. 314-318. (In Russ.). EDN: YRQADZ.

30. Evstigneeva S., Arazov N. Lean construction: maximizing value and minimizing waste // *German International Journal of Modern Science*. 2023;52:16-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.5281/zenodo.7747158>.

Информация об авторах

Козлов Роман Николаевич,
инженер-технолог,
Иркутский авиационный завод,
664020, г. Иркутск, ул. Новаторов, 3, Россия,
e-mail: seranaz@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0006-5597-7259>

Пешков Артем Витальевич,
к.э.н., доцент, доцент кафедры
строительного производства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
e-mail: artempeshkov@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5027-5120>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Roman N. Kozlov,
Process engineer,
Irkutsk Aviation Plant,
3 Novatorov St., Irkutsk 664020, Russia,
e-mail: seranaz@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0006-5597-7259>

Artem V. Peshkov,
Cand. Sci. (Econ.), Assistant Professor,
Assistant Professor of the Department
of Construction Production,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: artempeshkov@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5027-5120>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 28.02.2023.
Одобрена после рецензирования 30.03.2023.
Принята к публикации 31.03.2023.

Information about the article

The article was submitted 28.02.2023.
Approved after reviewing 30.03.2023.
Accepted for publication 31.03.2023.



Проект программного комплекса генерации машин Тьюринга, решающих *NP*-трудные задачи

В.И. Мартьянов¹

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Целью исследования является обобщение промежуточных результатов программной реализации концепции генерации машин Тьюринга, решающих *NP*-сложные задачи. Обсуждаются планы по разработке программного пакета для генерации машин Тьюринга, который может стать открытой платформой для обучения студентов теории алгоритмов и информационным технологиям; проведения всеми желающими экспериментов по определению неполиномиальной сложности решения определенной серии задач, сгенерированными машинами Тьюринга; участия всех желающих в генерации машин Тьюринга и решении *NP*-трудных задач на личных компьютерах; передачи результатов просчетов на платформу, являющуюся подобием генерации криптовалют, но осуществляющую поиск нетленных математических объектов, а не каких-то искусственно созданных на короткий период времени блоков чисел. Отмечается, что идея использования методов удовлетворения ограничений для генерации машин Тьюринга, решающих *NP*-трудные задачи, записанные на ленте, является расширением возможностей программирования в ограничениях и, возможно, будет успешной для решения вопроса о равенстве полиномиальной и *NP*-сложности ($P = ? NP$), что является одной из семи пока не решенных проблем третьего тысячелетия математики.

Ключевые слова: *NP*-трудные задачи, удовлетворение ограничений, программирование в ограничениях, искусственный интеллект, машины Тьюринга

Для цитирования: Мартьянов В.И. Проект программного комплекса генерации машин Тьюринга, решающих *NP*-трудные задачи // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 285–297. <https://elibrary.ru/uaewdt>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-285-297>.

Original article

Draft program complex for generating Turing machines solving *NP*-hard problems

Vladimir I. Martyanov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Baikal State University, Irkutsk, Russia

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Abstract. This paper provides an overview of the progress made in the software implementation of the concept for generating Turing machines that solve *NP*-hard problems. Plans are discussed for developing a software package for generating Turing machines, with the potential to serve as an open-source educational platform for learning algorithm theory and information technologies. The proposed program complex also encompasses the opportunity for interested individuals to conduct experiments aimed at

determining the NP-hardness of specific problem series generated by Turing machines; participating in the generation of Turing machines and solving NP-hard problems on personal computers; transferring the calculation results to a platform, similar to the generator of cryptocurrencies, which focuses on searching for timeless mathematical objects, instead of creating artificially generated blocks of numbers for a short period. It is noted that the idea of using constraint satisfaction methods to generate Turing machines for solving tape NP-hard problems extends the boundaries of constraint programming. Furthermore, it holds the potential for contributing to the resolution of the long-standing question regarding the equality of polynomial and NP-hardness ($P = ? NP$) – one of the seven unsolved problems of the third millennium in mathematics to this day.

Keywords: NP-hard problems, satisfying constraints, programming in constraints, artificial intelligence, Turing machines

For citation: Martyanov V.I. Draft program complex for generating Turing machines solving NP-hard problems. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(2):285-297. (In Russ.). <https://elibrary.ru/uaewdt>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-285-297>.

ВВЕДЕНИЕ

Программный комплекс генерации машин Тьюринга (ПКГМТ), решающих NP-сложные задачи, основан на методах, предложенных в работах [1–5], функционирует до некоторой степени подобно генераторам криптовалют [6–8], но формирует машины Тьюринга (МТ), решающие математические задачи. С точки зрения программной реализации ПКГМТ является результатом применения расширенной концепции программирования в ограничениях [9–10].

Автор данной работы считает, что, может быть, это станет путем отрицательного решения проблемы $P = ? NP$ [11–13].

1. Структура программного комплекса ПКГМТ генерации МТ.

1.1. Начальные данные пишутся на ленте МТ [14, 15] и как математический объект представляют формулы исчисления высказываний. Напомним, что именно алгоритмическая сложность проверки выполнимости высказываний $\alpha(x_1, x_2, \dots, x_n)$ объявлена NP-трудной (полной) задачей. В табл. 1 в 1-ой клетке прописан начальный элемент ленты 0000 и эту клетку считывает головка МТ готовая к исполнению прописанной команды МТ.

1.2. Алфавит МТ $ho_alphabet.slw = \{0; 1; b; e; \#; 5; 6\}$, который в ПКГМТ представлен следующим образом (табл. 2).

1.3. Совокупность состояний МТ $ho_state.slw = \{q; q0, q1, q2, q3\}$,

где q – начальное состояние; $q0$ – стоп (конец работы); $q1, q2, q3$ – без свойств, в ПКГМТ представлена в табл. 3.

1.4. Совокупность движений головки МТ $ho_displace.slw = \{right; left, stop\}$ в ПКГМТ представлена в табл. 4.

1.5. Программа МТ $ho_DMT.slw$ в ПКГМТ представлено в табл. 5.

1.6. Редактор программы МТ $ho_DMT.slw$ в ПКГМТ представлен в табл. 6.

Редактирование в данном случае может осуществляться для 2-ой команды вызовом одного из трех словарей. Покажем редактирование состояния в табл. 7.

1.7. Проектирование расписания занятий является одним из классов NP-трудных задач.

Основные множества: Дисц = $\{d1, d2, \dots, ds\}$ – дисциплины, Груп = $\{g1, g2, \dots, gu\}$ – учебные группы, Преп = $\{l1, l2, \dots, ls\}$ – преподаватели, Мн-во занятий: Зан $\subseteq$ Дисц $\otimes$ Груп $\otimes$ Преп. Врем = $\{t1, t2, \dots, tu\}$ – пары в двухнедельном цикле, Ауд = $\{a1, a2, \dots, aw\}$ – аудитории.

Необходимо построить Распис : Зан $\rightarrow$ Врем $\otimes$ Ауд, т.е. отображение, которое для (дисциплина, группа, преподаватель) определяет время проведения занятия и аудиторию.

Программа генерации МТ в ПКГМТ реализована во многом на технических решениях:

- проекта системы управления региональной сетью автомобильных дорог (СУРАД) Иркутской области [16];

- проекта построения графа автомобильных дорог для системы взимания платы с большегрузного транспорта [17];

- приложений логико-эвристических методов для расчета комбинаторных задач высокой сложности [3];

- программы сетевого планирования содержания сети автомобильных дорог Иркутской области [18];

- теоретико-множественные модели данных в задаче расчета вторичных структур РНК [19];

- программы планирования работ по нормативному содержанию сети автомобильных дорог [20];
- программы обработки видеорядов, снятых дорожными лабораториями на автомобильных дорогах [21];
- программы расчета (генерации) расписания [22], используемой с 2006 г. в ИРНТУ. Аналоги организации данных и требования

к расчету можно найти в итоговых результатах расчета расписания (табл. 8).

Карточка (табл. 8) показывает, что:

- занятия ставятся в первую смену или на стыковочную 4-ю пару;
- лекций (красный цвет) ставится не более 2-х в день;
- отсутствуют единственные занятия и «окна».

Таблица 1. Начальный фрагмент ленты MT в ПКГМТ

Table 1. The initial fragment of the MT tape in the software package for generating Turing machines

Выберите объект из списка:

0000 (b begin,q1)->(b begin,q2,right)

☐ 0000 (b begin,q1)->(b begin,q2,right)

☐ 0001 0

☐ 0002 0

☐ 0003 0

☐ 0004 0

☐ 0005 0

☐ 0006 e end

✓ Объект выбран

Убрать отметки объектов

✗ Отменить выбор

1. Общее количество объектов : 7

Таблица 2. Алфавит MT в ПКГМТ

Table 2. The MT alphabet in the software package for generating Turing machines

Выберите объект из списка:

1

☐ 0

☒ 1

☐ b begin

☐ e end

☐ # divide

☐ 5

☐ 6

☐ 7

✓ Объект выбран

Убрать отметки объектов

✗ Отменить выбор

1. Общее количество объектов : 8

Таблица 3. Совокупность состояний MT в ПКГМТ

Table 3. The totality of MT states in the software package for generating Turing machines

Выберите объект из списка:

q0 stop

☐ q begin

☒ q0 stop

☐ q1

☐ q2

☐ q3

☐ q4

☐ q5

☐ n6

✓ Объект выбран

Убрать отметки объектов

✗ Отменить выбор

1. Общее количество объектов : 8

Таблица 4. Совокупность движений головки МТ в ПКГМТ

Table 4. The totality of the movements of the MT head in the software package for generating Turing machines

Выберите объект из списка:

left

☐ right

☒ left

☐ stop

✓ Объект выбран Убрать отметки объектов Отменить выбор

1. Общее количество объектов : 3

Таблица 5. Программа МТ в ПКГМТ

Table 5. Program MT in the software package for generating Turing machines

Выберите объект из списка:

(0,q0 stop)->(?,?,?)

☐ (0,q1)->(1,q begin,left)

☐ (0,q2)->(1,q begin,right)

☐ (0,q3)->(?,?,?)

☐ (1,q begin)->(5,q begin,left)

☐ (1,q0 stop)->(?,?,?)

☐ (1,q1)->(1,q1,left)

☒ (1,q2)->(e_end,q1,left)

☐ (1,q3)->(??,??)

✓ Объект выбран Убрать отметки объектов Отменить выбор

1. Общее количество объектов : 35

Таблица 6. Редактор программы МТ в ПКГМТ

Table 6. The editor of the MT program in the software package for generating Turing machines

Список объектов

Настройка экрана Операции проектирования Выход

ДМТ: Поиск покрытия	Команда 1-ая	Команда 2-ая	Команда 3-ая	Команда 4-ая	Команда 5-ая	Команда 6-ая	Команда 7-ая
Аргументы команды	0	0	0	0	0	1	1
Значение Символ	q begin	q0 stop	q1	q2	q3	q begin	q0 stop
Значение Состояние	0	???	1	1	???	5	???
Значение Сдвиг	right	???	left	right	???	left	???

ДМТ: Поиск покрытия	Команда 8-ая	Команда 9-ая	Команда 10-ая	Команда 11-ая	Команда 12-ая	Команда 13-ая	Команда 14-ая
Аргументы команды	q2	q3	# device	q begin	q0 stop	q1	q2
Значение Символ	e_end	???	0	???	???	???	???
Значение Состояние	q1	???	q begin	???	???	???	???
Значение Сдвиг	right	???	left	???	???	???	???

☐ Символ (аргумент) : 0

☐ Состояние (аргумент) : q0 stop

☐ Символ (значение): ???

☐ Состояние (значение): ???

☐ Двиг головки (значение): ???

Таблица 7. Редактор состояния во второй команде программы МТ в ПКГМТ
 Table 7. Status editor in the second command of the program MT in the software package for generating Turing machines

С:\prg\яя СПИСОК ОБЪЕКТОВ

Настройка экрана Операции проектирования Выход

ДМТ: Поиск покрытия	Команда 1 - ая	Команда 2 - ая	Команда 3 - ая	Команда 4 - ая	Команда 5 - ая	Команда 6 - ая	Команда 7 - ая
Аргументы команды	0	0	0	0	0	1	1
Значение Символ	q begin	q0 stop	q1				
Значение Состояние	q begin	???	q begin				
Значение Сдвиг	right	???	left				

Выберите объект из списка:

q0 stop

☐ q begin
☒ q0 stop
☐ q1
☐ q2
☐ q3
☐ q4
☐ q5
☐ n6

☒ Объект выбран

1. общее количество объектов : 8

ДМТ: Поиск покрытия	Команда 19 - ая	Команда 20 - ая	Команда 21 - ая	Команда 22 - ая	Команда 23 - ая	Команда 24 - ая	Команда 25 - ая
Аргументы команды	e end	e end	# devide	# devide	# devide	# devide	# devide
Значение Символ	q2	q3	q begin	q0 stop	q1	q2	q3
Значение Состояние	q1	???	q begin	???	???	???	???
Значение Сдвиг	right	???	left	???	???	???	???

☐ Символ (аргумент) : 0
☐ Состояние (аргумент) : q0 stop
☐ Символ (значение) : ???
☒ Состояние (значение) : ???
☐ Двиг головки (значение) : ???

Таблица 8. Карточка подгруппы АСУб-22-1-2
 Table 8. Subgroup card ASUb-22-1-2

D:\2022\22_23\2333-07\2333-07П ОБЪЕКТ: АСУб-22-1(И,О)

Настройка экрана Операции проектирования Выход

29.08-03.09	ПОНЕДЕЛЬНИК	ВТОРНИК	СРЕДА	ЧЕТВЕРГ	ПЯТНИЦА	СУББОТА
1 - с 8:15 по 9:45		Информатика; Иностранный язык	Физика; АСУб-22-1(И,О); АСУб-22-1-2(И,О)	Дискретная математика; АСУб-22-1(И,О);		
2 - с 10:00 по 11:30	Физика; АСУб-22(И,О); И(АСУб-22(И,О); И(АСУб-22-1(И,О); АСУб-22-1(И,О);	Математика; АСУб-22-1(И,О); АСУб-22-1(И,О);	Элективные курсы	Математика; АСУб-22(И,О); АСУб-22-1(И,О);	Дискретная математика; АСУб-22(И,О); АСУб-22-1(И,О);	Введение в программирование; АСУб-22-1(И,О);
3 - с 11:45 по 13:15	Иностранный язык; Программирование; АСУб-22-1-2(И,О); АСУб-22-1(И,О);	Физическая культура; АСУб-22(И,О); И(АСУб-22-1(И,О); АСУб-22-1(И,О);		Программирование; АСУб-22-1-2(И,О); АСУб-22-1(И,О);	Введение в программирование; АСУб-22-1(И,О);	
4 - с 13:45 по 15:15		Физика; АСУб-22-1-2(И,О);	Основы делового общения; АСУб-22-1(И,О);		Введение в программирование; АСУб-22-1-2(И,О);	
5 - с 15:30 по 17:00						
6 - с 17:10 по 18:40						

05.09-10.09	ПОНЕДЕЛЬНИК	ВТОРНИК	СРЕДА	ЧЕТВЕРГ	ПЯТНИЦА	СУББОТА
1 - с 8:15 по 9:45	Информатика; АСУб-22-1(И,О); АСУб-22(И,О); АСУб-22-1-2(И,О);	Программирование; Иностранный язык; АСУб-22(И,О); АСУб-22-1-2(И,О);				
2 - с 10:00 по 11:30	Физика; АСУб-22(И,О); И(АСУб-22(И,О); И(АСУб-22-1(И,О); АСУб-22-1(И,О);	Математика; АСУб-22(И,О); АСУб-22-1(И,О);	Элективные курсы	Математика; АСУб-22(И,О); АСУб-22-1(И,О);	Дискретная математика; АСУб-22(И,О); АСУб-22-1(И,О);	Введение в программирование; АСУб-22-1(И,О);
3 - с 11:45 по 13:15	Иностранный язык; АСУб-22-1-2(И,О);	Физическая культура; АСУб-22(И,О); И(АСУб-22-1(И,О); АСУб-22-1(И,О);	Дискретная математика; АСУб-22(И,О); АСУб-22-1(И,О);	Программирование; АСУб-22-1-2(И,О); АСУб-22-1(И,О);	Введение в программирование; АСУб-22-1(И,О);	
4 - с 13:45 по 15:15			Основы делового общения; АСУб-22-1(И,О);		Программирование; АСУб-22-1-2(И,О);	
5 - с 15:30 по 17:00						
6 - с 17:10 по 18:40						

☐ Предмет : Физика;
☐ Преподаватель(и) : Баранов Е.О.;
☐ Контингент(и) : АСУб-22-1-2(И,О);
☐ Аудитория(и) : Б-206;

☐ день недели : ВТОРНИК
☐ пара : 4 - с 13:45 до 15:15
☐ Четность недели : НЕЧЕТНАЯ НЕДЕЛЯ
☐ Номер занятия : 6509;

☐ Вид работы : 2. лабораторные работы
☐ кафедра : Физики
☐ дата проведения : 30.08
☐ период проведения : 29.08 до 25.12

КОЛ-ВО УЧАЩИХСЯ: 12
 ВМЕСТИМОСТЬ : 30

Таблица 9. Карточка преподавателя Е.С. Друговой
Table 9. Teacher's card by E.S. Drugova

D:\2022\22_23\233-070 ОБЪЕКТ: Другова Е.С.

Настройка экрана
Операции проектирования
Выход

29.08-03.09	ПОНЕДЕЛЬНИК	ВТОРНИК	СРЕДА	ЧЕТВЕРГ	ПЯТНИЦА	СУББОТА
1-с 8:15 по 9:45	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ
2-с 10:00 по 11:30		Управление общ ЖР6-21(И,О);				ОСВОБОДИТЬ
3-с 11:45 по 13:15		Жанры PR-текст ЖР6-20-2(И,О);	Жанры PR-текст ЖР6-20(И,О);			ОСВОБОДИТЬ
4-с 13:45 по 15:15		Пользовательск ЖР6-19(И,О);	Управление общ ЖР6-21-1(И,О);	Пользовательск ЖР6-19-1-1(И,О);		ОСВОБОДИТЬ
5-с 15:30 по 17:00		Жанры PR-текст ЖР6-20-1(И,О);		Пользовательск ЖР6-19-1-2(И,О);		ОСВОБОДИТЬ
6-с 17:10 по 18:40	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ

05.09-10.09	ПОНЕДЕЛЬНИК	ВТОРНИК	СРЕДА	ЧЕТВЕРГ	ПЯТНИЦА	СУББОТА
1-с 8:15 по 9:45	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ
2-с 10:00 по 11:30		Управление общ ЖР6-21(И,О);				ОСВОБОДИТЬ
3-с 11:45 по 13:15		Реклама в меди ЖР6-21(И,О);	Жанры PR-текст ЖР6-20(И,О);	Реклама в меди ЖР6-21-1(И,О);		ОСВОБОДИТЬ
4-с 13:45 по 15:15			Управление общ ЖР6-21-1(И,О);	Пользовательск ЖР6-19-1-1(И,О);		ОСВОБОДИТЬ
5-с 15:30 по 17:00				Пользовательск ЖР6-19-1-2(И,О);		ОСВОБОДИТЬ
6-с 17:10 по 18:40	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ	ОСВОБОДИТЬ

☐ Предмет :
☐ Преподаватель(и) :
☐ Контингент(ы) :
☐ Аудитория(и) :

КОЛ-ВО УЧАЩИХСЯ: 16

☐ День недели : ПЯТНИЦА
☐ Пара : 5 – с 15:30 до 17:00
☐ Четность недели : ЧЕТНАЯ НЕДЕЛЯ
☐ Номер занятия :

☐ Вид работы :
☐ Кафедра :
☐ Дата проведения :
☐ Период проведения : ДО

Карточка (табл. 9) показывает, что:

- лекций (красный цвет) ставится не более 2-х в день;
- отсутствуют единственные занятия и «окна»;
- учитываются пожелания преподавателя на освобождение времени от занятий.

Кроме того, размерность задачи проектирования расписания для ИРНТУ имеет очень большую размерность, а именно $(400 \times 72) \times 10000$ (практически сравнима с размерностью задачи генерации МТ при количестве элементов алфавита и совокупности состояний не более 10). Следует из числа занятий примерно 10 000, числа аудиторий бо-

лее 400 и количества пар 72 в 2-недельном цикле. Расчет расписания занимает чуть более недели на настольном компьютере, причем качество расписания недостижимо для ручного проектирования.

2. Результаты просчетов программного комплекса ПКГМТ генерации МТ.

2.1. Пока не ставится цель провести предельно большие просчеты, так как еще не реализованы многие компоненты ПКГМТ и многие стратегии оптимизации переборов (например, применение параллельных вычислений). Самый глубокий просчет проводился в течение 2-х сут. на настольном компьютере, полученные результаты приведены в табл. 10.

Таблица 10. Описание результатов просчета

Table 10. Description of the calculation results

Параметр	Кол-во шагов или этапов генерации	Параметр	Кол-во шагов или этапов генерации
Общее число шагов генерации	624 425 886	Общее число выполнимых формул	3 733 146
Общее число не выполнимых формул	7 264 362	Количество сгенерированных МТ	8797

Таблица 11. Последняя сгенерированная МТ

Table 11. The last generated MT

Аргументы команд			Значения команд (функции: печати, перехода состояний, сдвига головки)			Аргументы команд			Значения команд (функции: печати, перехода состояний, сдвига головки)		
№ команд	Символ	Состояние	Символ	Состояние	Двиг головки	№ команд	Символ	Состояние	Символ	Состояние	Сдвиг головки
1	0	q begin	0	q begin	right	19	e end	q2	# divide	q1	left
2	0	q0 stop	?	?	?	20	e end	q3	# divide	q3	left
3	0	q1	1	q begin	left	21	# divide	q begin	0	q begin	left
4	0	q2	1	q begin	right	22	# divide	q0 stop	?	?	?
5	0	q3	1	q2	right	23	# divide	q1	# divide	q1	left
6	1	q begin	5	q begin	left	24	# divide	q2	5	q1	left
7	1	q0 stop	?	?	?	25	# divide	q3	5	q3	left
8	1	q1	1	q1	left	26	5	q begin	6	q begin	left
9	1	q2	# divide	q1	left	27	5	q0 stop	?	?	?
10	1	q3	6	q2	left	28	5	q1	e end	q2	left
11	b begin	q begin	?	?	?	29	5	q2	6	q1	left
12	b begin	q0 stop	?	?	?	30	5	q3	# divide	q2	left
13	b begin	q1	b begin	q2	right	31	6	q begin	0	q1	left
14	b begin	q2	b begin	q3	right	32	6	q0 stop	?	?	?
15	b begin	q3	b begin	q1	right	33	6	q1	?	?	?
16	e end	q begin	0	q begin	left	34	6	q2	0	q2	right
17	e end	q0 stop	?	?	?	35	6	q3	e end	q3	left
18	e end	q1	5	q2	left						

В настоящем варианте ПКГМТ промежуточные варианты МТ не сохраняются и доступен для рассмотрения только последний вариант сгенерированной МТ, *которая не является решателем NP-трудных задач*. Отметим, что МТ с программой, определенной табл. 11, определяет не одну, а целый спектр МТ, получающийся доопределением команд с неопределенными значениями (???). И все

эти МТ также *не будут решателями NP-трудных задач*.

Без комментариев приведем пример команд МТ-решателя NP-трудных задач (табл. 12), который был получен с использованием эвристик, исключающих возможность найти *все решатели NP-трудных задач* (именно это и необходимо для решения проблемы $P = ? NP$).

Таблица 12. Команды МТ-решателя NP-трудных задач

Table 12. MT-solver commands for NP-hard problems

Состояние	Буква	Состояние	Буква	Сдвиг
0 S r D p 0 n o	2 ☀	1 S r D a 0 n o	2 ☀	1 вправо
1 S r D a 0 n o	0 0 p 0 n	0 S r D p 0 n o	7 0 a 0 n	1 вправо
1 S r D a 0 n o	1 1 p 1 n	2 S r D p 1 n o	13 1 a 1 n	1 вправо
0 S r D p 0 n o	0 0 p 0 n	0 S r D p 0 n o	0 0 p 0 n	1 вправо
0 S r D p 0 n o	1 1 p 1 n	0 S r D p 0 n o	1 1 p 1 n	1 вправо
0 S r D p 0 n o	4 # p 0 n	3 S r R a 0 n o	6 # a 0 n	1 вправо
2 S r D p 1 n o	4 # p 0 n	4 S r R a 1 n o	6 # a 0 n	1 вправо
3 S r R a 0 n o	0 0 p 0 n	5 S R p 0 n o	7 0 a 0 n	0 влево
4 S r R a 1 n o	0 0 p 0 n	6 S R p 1 n o	11 0 a 1 n	0 влево
3 S r R a 0 n o	1 1 p 1 n	5 S R p 0 n o	14 1 a 1 y	0 влево
4 S r R a 1 n o	1 1 p 1 n	7 S R p 0 n c	13 1 a 1 n	0 влево
5 S R p 0 n o	6 # a 0 n	8 S D p 0 n o	6 # a 0 n	0 влево
6 S R p 1 n o	6 # a 0 n	8 S D p 0 n o	6 # a 0 n	0 влево
7 S R p 0 n c	6 # a 0 n	9 S D p 0 n c	6 # a 0 n	0 влево
8 S D p 0 n o	0 0 p 0 n	8 S D p 0 n o	0 0 p 0 n	0 влево
9 S D p 0 n c	0 0 p 0 n	9 S D p 0 n c	0 0 p 0 n	0 влево
8 S D p 0 n o	1 1 p 1 n	8 S D p 0 n o	1 1 p 1 n	0 влево
9 S D p 0 n c	1 1 p 1 n	9 S D p 0 n c	1 1 p 1 n	0 влево
8 S D p 0 n o	7 0 a 0 n	1 S r D a 0 n o	0 0 p 0 n	1 вправо
9 S D p 0 n c	7 0 a 0 n	10 S r D a 0 n c	0 0 p 0 n	1 вправо
8 S D p 0 n o	13 1 a 1 n	12 S r D a 1 n o	1 1 p 1 n	1 вправо
9 S D p 0 n c	13 1 a 1 n	11 S r D a 1 n c	1 1 p 1 n	1 вправо
1 S r D a 0 n o	0 0 p 0 n	0 S r D p 0 n o	7 0 a 0 n	1 вправо
1 S r D a 0 n o	1 1 p 1 n	0 S r D p 0 n o	13 1 a 1 n	1 вправо
10 S r D a 0 n c	0 0 p 0 n	13 S r D p 0 n c	7 0 a 0 n	1 вправо
10 S r D a 0 n c	1 1 p 1 n	13 S r D p 0 n c	13 1 a 1 n	1 вправо
12 S r D a 1 n o	0 0 p 0 n	0 S r D p 0 n o	7 0 a 0 n	1 вправо
12 S r D a 1 n o	1 1 p 1 n	0 S r D p 0 n o	13 1 a 1 n	1 вправо
11 S r D a 1 n c	0 0 p 0 n	14 S r D p 1 n c	7 0 a 0 n	1 вправо
11 S r D a 1 n c	1 1 p 1 n	14 S r D p 1 n c	13 1 a 1 n	1 вправо
1 S r D a 0 n o	6 # a 0 n	15 S r R p 0 y o	6 # a 0 n	1 вправо
10 S r D a 0 n c	6 # a 0 n	16 S r R p 0 n c	6 # a 0 n	1 вправо
12 S r D a 1 n o	6 # a 0 n	17 S r R p 1 y o	6 # a 0 n	1 вправо
11 S r D a 1 n c	6 # a 0 n	18 S r R p 1 y c	6 # a 0 n	1 вправо
15 S r R p 0 y o	0 0 p 0 n	19 S r R p 0 n o	0 0 p 0 n	1 вправо
15 S r R p 0 y o	1 1 p 1 n	15 S r R p 0 y o	1 1 p 1 n	1 вправо
15 S r R p 0 y o	10 1 p 1 y	15 S r R p 0 y o	10 1 p 1 y	1 вправо

16 S r R p 0 y c	0 0 p 0 n		16 S r R p 0 n c	0 0 p 0 n	1 вправо
16 S r R p 0 y c	1 1 p 1 n		16 S r R p 0 n c	1 1 p 1 n	1 вправо
16 S r R p 0 y c	10 1 p 1 y		16 S r R p 0 n c	1 1 p 1 n	1 вправо
17 S r R p 1 y o	0 0 p 0 n		20 S r R p 1 n o	0 0 p 0 n	1 вправо
17 S r R p 1 y o	1 1 p 1 n		17 S r R p 1 y o	1 1 p 1 n	1 вправо
17 S r R p 1 y o	10 1 p 1 y		17 S r R p 1 y o	10 1 p 1 y	1 вправо
18 S r R p 1 y c	0 0 p 0 n		18 S r R p 1 y c	0 0 p 0 n	1 вправо
18 S r R p 1 y c	1 1 p 1 n		18 S r R p 1 y c	1 1 p 1 n	1 вправо
18 S r R p 1 y c	10 1 p 1 y		18 S r R p 1 y c	1 1 p 1 n	1 вправо
15 S r R p 0 y o	4 # p 0 n		20 WIN		СТОП
16 S r R p 0 n c	4 # p 0 n		8 S l D p 0 n o	4 # p 0 n	0 влево
17 S r R p 1 y o	4 # p 0 n		20 WIN		СТОП
18 S r R p 1 y c	4 # p 0 n		8 S l D p 0 n o	4 # p 0 n	0 влево
20 S r R p 1 n o	4 # p 0 n		8 S l D p 0 n o	4 # p 0 n	0 влево
8 S l D p 0 n o	6 # a 0 n		1 S r D a 0 n o	4 # p 0 n	1 вправо
15 S r R p 0 y o	3 ☐		20 WIN		СТОП
16 S r R p 0 n c	3 ☐		22 B l D p 0 n o	3 ☐	0 влево
17 S r R p 1 y o	3 ☐		20 WIN		СТОП
18 S r R p 1 y c	3 ☐		22 B l D p 0 n o	3 ☐	0 влево
20 S r R p 1 n o	3 ☐		22 B l D p 0 n o	3 ☐	0 влево
22 B l D p 0 n o	0 0 p 0 n		22 B l D p 0 n o	0 0 p 0 n	0 влево
22 B l D p 0 n o	1 1 p 1 n		22 B l D p 0 n o	1 1 p 1 n	0 влево
22 B l D p 0 n o	4 # p 0 n		22 B l D p 0 n o	4 # p 0 n	0 влево
22 B l D p 0 n o	10 1 p 1 y		23 B l D a 0 n o	5 1 p 0 n	0 влево
23 B l D a 0 n o	10 1 p 1 y		23 B l D a 0 n o	5 1 p 0 n	0 влево
22 B l D p 0 n o	0 0 p 0 n		23 B l D a 0 n o	0 0 p 0 n	0 влево
23 B l D a 0 n o	1 1 p 1 n		23 B l D a 0 n o	1 1 p 1 n	0 влево
23 B l D a 0 n o	2 ☀		24 B r D a 0 n c	2 ☀	1 вправо
24 B r D a 0 n c	15 ►		23 B l D a 0 n o	15 ►	0 влево
23 B l D a 0 n o	4 # p 0 n		24 B r D a 0 n c	4 # p 0 n	1 вправо
24 B r D a 0 n c	0 0 p 0 n		24 B r D a 0 n c	0 0 p 0 n	1 вправо
24 B r D a 0 n c	1 1 p 1 n		24 B r D a 0 n c	1 1 p 1 n	1 вправо
24 B r D a 0 n c	4 # p 0 n		1 S r D a 0 n o	4 # p 0 n	1 вправо

2.2. Уже на данном начальном этапе обнаруживаются достаточно интересные закономерности, которые, наверное, трудно предсказать (или предвидеть), пытаясь решать проблему умозрительно. Например, все найденные *MT-решатели NP*-трудных задач (блок-тестов ниже) демонстрируют неполиномиальный рост количества шагов решения на следующем блоке тестов:

$$\begin{aligned} & (\neg x_1 \vee x_2 \vee \neg x_3 \vee \neg x_4 \vee \neg x_5 \vee \neg x_6) \wedge (\neg x_1 \vee \neg x_2 \vee \\ & \quad x_3 \vee \neg x_4 \vee \neg x_5 \vee \neg x_6) \wedge \\ & (\neg x_1 \vee \neg x_2 \vee \neg x_3 \vee x_4 \vee \neg x_5 \vee x_6) \wedge (\neg x_1 \vee \neg x_2 \vee \end{aligned}$$

$$\neg x_3 \vee \neg x_4 \vee x_5 \vee x_6) \wedge (\neg x_1 \vee \neg x_2 \vee \neg x_3 \vee \neg x_4 \vee \neg x_5 \vee x_6); \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
& (\neg x_1 \vee x_2 \vee \neg x_3 \vee \neg x_4 \vee \neg x_5 \vee \neg x_6 \vee \neg x_7) \wedge (\neg x_1 \vee \\
& \quad \neg x_2 \vee x_3 \vee \neg x_4 \vee \neg x_5 \vee \neg x_6 \vee \neg x_7) \wedge \\
& (\neg x_1 \vee \neg x_2 \vee \neg x_3 \vee x_4 \vee \neg x_5 \vee x_6 \vee \neg x_7) \wedge (\neg x_1 \vee \\
& \quad \neg x_2 \vee \neg x_3 \vee \neg x_4 \vee x_5 \vee \neg x_6 \vee x_7) \wedge \\
& (\neg x_1 \vee \neg x_2 \vee \neg x_3 \vee \neg x_4 \vee \neg x_5 \vee x_6 \vee x_7) \wedge (\neg x_1 \vee \\
& \quad \neg x_2 \vee \neg x_3 \vee \neg x_4 \vee \neg x_5 \vee \neg x_6 \vee x_7).
\end{aligned} \tag{2}$$

Следующие формулы строятся по принципу перехода от формулы (1) к формуле (2). Конкретно, МТ с программой по табл. 12 проверяет выполнимость формулы (1) за 101 шаг;

формулы (2) за 240 шагов и так далее, т.е. рост количества шагов решения идет по экспоненте, хотя, конечно, будут сгенерированы другие решатели, где это будет происходить иначе. Следует из того, что МТ реализуют любые алгоритмы [9] и значит, может быть, придется работать с отгенерированными МТ «индивидуально».

3. Математические аспекты создания программного комплекса ПКГМТ генерации МТ.

Данный раздел практически цитата из статьи [1]. В работе [1] генерация МТ для решения NP-трудных задач была рассмотрена достаточно полно, причем перебор программ МТ будем оптимизировать методами УО.

Машина Тьюринга имеет следующие части:

1) *Конечная лента* L , разделенная на ячейки. В процессе работы ДМТ с обеих сторон ленты могут пристраиваться новые ячейки, поэтому ленту L можно считать *потенциально бесконечной*. В каждой из ячеек прописан некоторый символ из алфавита $A = \{a_0, a_1, a_2, \dots, a_n\}$, т.е. в ячейках ленты a_{ij} являются символами алфавита A . В процессе работы МТ символы в ячейках ленты L могут меняться (или не меняться). Ленту L называют также *внешней памятью МТ*. При пристраивании новой ячейки слева или справа предполагаем, что в ней прописывается один и тот же выделенный символ алфавита $A = \{a_0, a_1, \dots, a_n\}$, а именно, a_0 , причем в этом случае ячейка считается пустой.

2) *Множество состояний МТ* $Q = \{q_0, q_1, q_2, \dots, q_m\}$, элементы которого называются *внутренней памятью*. В дальнейшем предполагаем, что МТ *всегда находится только в одном состоянии* (почему называется детерминированной, а не детерминированная машина Тьюринга может одновременно находиться более чем в одном состоянии). Состояние q_0 называется *заключительным* (или *стоп-состоянием*) при получении которого работа МТ прекращается.

3) *Управляющая головка*. Это устройство считывает информацию *только* из одной ячейки ленты L .

4) *Схема работы МТ*. Один такт работы МТ состоит в считывании головкой информации из ячейки ленты МТ и прописывания в эту ячейку некоторого символа алфавита $A = \{a_0, a_1, \dots, a_n\}$ и сдвига головки (*обязательно!*) МТ в соседнюю левую или правую ячейку, а ДМТ переходит в некоторое состояние из множества $Q = \{q_0, q_1, q_2, \dots, q_m\}$. Отметим, что МТ может работать *бесконечно* (или *вечно*), так как заключительное состояние q_0 мо-

жет оказаться *недостижимым*. Состоянием (машинным словом или конфигурацией) МТ будем называть совокупность, образованную последовательностью $a_{j1}, a_{j2}, \dots$, символов всех ячеек ленты, состоянием внутренней памяти q_i и номером k воспринимаемой ячейки a_{jk} .

Таким образом, каждое машинное слово содержит только *одно* вхождение символа состояния q_i . Для рассматриваемого здесь машинного слова символ q_i стоит на позиции k , что позволяет записать его следующей последовательностью:

$$a_{j1} a_{j2} \dots a_{jk-1} q_i a_{ik} \dots a_{js}. \quad (3)$$

Важно отметить, что каждое машинное слово всегда заканчивается символом алфавита (если головка сдвигается вправо от последнего символа машинного слова, то справа приписывается символ a_0 , т.е. справа к ленте приписывается пустая ячейка), но может начинаться символом состояния q_i .

5) *Функции перехода, печати и сдвига*.

Функция перехода состояний:

$Pass : (Q \times A) \rightarrow Q$;

Функция печати:

$Print : (Q \times A) \rightarrow A$;

Функция сдвига головки:

$Displ : (Q \times A) \rightarrow \{-1, 1\}$.

Рассмотрим преобразование машинного слова (16) после применения выше определенных функций. Пусть $Pass(q_i, a_{ik}) = q_\xi$; $Print(q_i, a_{ik}) = a_\lambda$; $Displ(q_i, a_{ik}) = t$. Тогда в зависимости от значения t (-1 соответствует сдвигу головки по ленте влево, а 1 – сдвигу головки вправо) возможны следующие два варианта.

1 *вариант*. Пусть $t = -1$. Тогда машинное слово (3) будет преобразовано в последовательность

$$a_{j1} a_{j2} \dots q_\xi a_{jk-1} a_\lambda \dots a_{js}.$$

2 *вариант*. Пусть $t = 1$. Тогда машинное слово (3) будет преобразовано в последовательность

$$a_{j1} a_{j2} \dots a_{jk-1} a_\lambda q_\xi a_{jk+1} \dots a_{js}.$$

Функции $Pass$, $Print$, $Displ$ называют *программой МТ*, а начальную ленту L – *задачей*. На ленте МТ можно записывать классические NP-трудные задачи: выполнимости (SAT), раскраски графов, существования покрытия и др. [5].

Методы УО можно применять для ускорения перебора входных данных (задачи на ленте МТ), а также для ускорения перебора программ МТ (функций $Pass$, $Print$, $Displ$), что, возможно, обещает весьма неожиданные результаты. В статье [1] отмечается, что *генерация программ* (хотя бы только для МТ) является *принципиально новым* шагом, а

в настоящей работе показаны результаты, которые могут быть значительно продвинуты вперед в ближайшее время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Создание открытой платформы по генерации программ МТ, решающих *NP*-трудные задачи, будет интересным экспериментом, создающим возможность участия как студентов, изучающих информационные технологии, так и продвинутых исследователей проблемы $P = ? NP$.

2. Кроме того, возможны эксперименты по созданию решателей для других *NP*-трудных

задач, коих, имеющих большое прикладное значение, очень и очень много. Например, [23–28]:

- приближительные вычисления;
- конфигурация;
- криптография;
- сбор данных;
- поддержка при принятии решения;
- филогенетика;
- планирование;
- расписания;
- маршрутизация.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мартьянов В.И. *NP-трудные задачи: автоматическое доказательство теорем и машины Тьюринга* // Baikal Research Journal. 2021. Т.12. № 4. С. 11–20. [https://doi.org/10.17150/2411-6262.2021.12\(4\).11](https://doi.org/10.17150/2411-6262.2021.12(4).11).
2. Мартьянов В.И. Логико-эвристические методы сетевого планирования и распознавание ситуаций // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Самара, 2001. С. 209–215.
3. Мартьянов В.И., Архипов В.В., Каташевцев М.Д., Пахомов Д.В. Обзор приложений логико-эвристических методов решения комбинаторных задач высокой сложности // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 4 (28). С. 205–211. EDN: NRBKXP.
4. Мартьянов В.И., Сухорутченко В.В., Окунцов В.В. Планирование информационных потоков в иерархической системе // Прикладные системы. М.: ИАП РАН, 1992. С. 46–58.
5. Мартьянов В.И., Вяткин И.В., Могильницкий Э.Ю. Теоретический и реализационный аспекты некоторых классов задач сетевого управления // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Самара, 1999. С. 203–208.
6. Лагутенков А.В. Криптовалюты. Правила применения // Наука и жизнь. 2018. № 2. С. 22–26.
7. Kharpal A. All you need to know about the top 5 cryptocurrencies // Yahoo! [Электронный ресурс]. URL: <https://finance.yahoo.com/news/know-top-5-cryptocurrencies-093231173.html> (14.03.2023).
8. Wilson-Nunn D., Zenil N. On the Complexity and Behaviour of Cryptocurrencies Compared to Other Markets // Research Gate [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/268079329_On_the_Complexity_and_Behaviour_of_Cryptocurrencies_Compared_to_Other_Markets (14.03.2023).
9. Щербина О.А. Удовлетворение ограничений и программирование в ограничениях (препринт). Vienna: University of Vienna, 2012. 118 с.
10. Hentenryck van P. Constraint Satisfaction in Logic Programming. Cambridge: The MIT Press, 1989. 356 p.
11. Стюарт И. Величайшие математические задачи / Пер. с англ. Н. Лисовой. М.: Альпина нон-фикшн, 2015. 460 с.
12. Разборов А.А. Алгебраическая сложность. М.: Московский центр непрерывного математического образования, 2016. 32 с.
13. Fortnow L. The Golden Ticket: P, NP, and the Search for the Impossible. Princeton: Princeton University Press, 2013.
14. Мальцев А.И. Алгоритмы и рекурсивные функции. М.: Наука, 1965. 392 с.
15. Корольков Ю.Д., Мартьянов В.И. Дискретные модели: представление конечными деревьями и разрешимость формальных теорий. Иркутск: Изд-во Иркутского национального исследовательского технического университета, 2017. 160 с.
16. Кулик Н.С., Мартьянов В.И., Пахомов Д.В., Большаков Э.А. Проект системы управления региональной сетью автомобильных дорог (СУРАД) Иркутской области // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 4 (87). С. 118–123. EDN: SBNFNJ.
17. Кулик Н.С., Мартьянов В.И., Пахомов Д.В. Построение графа автомобильных дорог для системы взимания платы с большегрузного транспорта // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 4 (111). С. 96–101. EDN: VVSOFF. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-4-96-101>.
18. Мартьянов В.И., Пахомов Д.В., Архипов В.В. Сетевое планирование содержания сети автомобильных дорог Иркутской области // Новые технологии в инвестиционно-строительной сфере и ЖКХ: сб. науч. трудов: в 2 т. Т. 1. Иркутск: Иркутский государственный технический университет, 2005. С. 123–129.
19. Мартьянов В.И. Теоретико-множественные модели данных в задаче расчета вторичных структур РНК // System Analysis & Mathematical Modeling. 2022. Т. 4. № 4. С. 343–357. EDN: VUNLFX. [https://doi.org/10.17150/2713-1734.2022.4\(4\).343-357](https://doi.org/10.17150/2713-1734.2022.4(4).343-357).
20. Мартьянов В.И., Корольков Ю.Д. Теоретико-множественные модели сложных систем и алгоритмы интеллектуальной поддержки. Иркутск:

Изд-во Байкальского государственного университета, 2020. 188 с.

21. Mart'yanov V.I., Katashevstev M.D. Computer processing of distorted video sequences obtained by mobile road laboratories // Investments, Construction, Real Estate: New Technologies and Special-Purpose Development Priorities: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Irkutsk, 25 April 2019). 2019. Vol. 667. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/667/1/012060>.
22. Мартьянов В.И. Теоретико-множественный анализ организации данных учебного процесса и алгоритмы проектирования расписания с элементами искусственного интеллекта // Прикладные проблемы дискретного анализа: сб. науч. тр. 2021. С. 90–100. EDN: BVANFU.
23. Leeuwen J.V. Handbook of Theoretical Computer Science. Vol. A, Algorithms and complexity. Amsterdam: Elsevier, 1998. 1020 p.

24. Knuth D. Postscript about NP-hard problems // ACM SIGACT News. 1974. Vol. 6. No. 2. P. 15–16. <https://doi.org/10.1145/1008304.1008305>.
25. Aaronson S. The Scientific Case for P≠NP // Shtetl-Optimized [Электронный ресурс]. URL: <https://scottaaronson.blog/?p=1720> (25.09.2016).
26. Aaronson S. PHYS771 Lecture 6: P, NP, and Friends // Scott Aaronson.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://www.scottaaronson.com/democritus/lec6.html> (25.09.2016).
27. Lawler E.L., Lenstra J.K., Rinnooy Kan A.H.G., Shmoys D.B. The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization. John Wiley & Sons, 1985. 75 p.
28. Wegener I. Complexity Theory: Exploring the Limits of Efficient Algorithms. Springer, 2005. P. 189. <https://doi.org/10.1007/3-540-27477-4>.

REFERENCES

1. Mart'yanov V.I. NP-difficult tasks: automatic proof of theorems and Turing's machine. *Baikal Research Journal*. 2021;12(4):11. (In Russ.). [https://doi.org/10.17150/2411-6262.2021.12\(4\).11](https://doi.org/10.17150/2411-6262.2021.12(4).11).
2. Mart'yanov V.I. Logical-heuristic methods of network planning and situation recognition. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh*. Samara; 2001. p. 203-215. (In Russ.).
3. Mart'yanov V.I., Arkhipov V.V., Katashevstev V.I. Mart'yanov, V.V. Arkhipov, M., Pakhomov D.V. Logic-heuristic methods for solving combinatorial problems of high complexity applications preview. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2010;4:205-211. (In Russ.). EDN: NRBKXP.
4. Mart'yanov V.I., Sukhorutchenko V.V., Okuntsov V.V. Planning of information flows in a hierarchical system. In: *Prikladnye sistemy*. Moscow: Institute of Design Automation of the Russian Academy of Sciences; 1992. p. 46–58. (In Russ.).
5. Mart'yanov V.I., Vyatkin I.V., Mogil'nitskii E.Yu. Theoretical and implementation aspects of some classes of network management tasks. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh*. Samara; 1999. p. 203-208. (In Russ.).
6. Lagutenkov A.V. Cryptocurrencies. Application rules. *Nauka i zhizn'*. 2018;2:22-26. (In Russ.).
7. Kharpal A. All you need to know about the top 5 cryptocurrencies. *Yahoo!* Available from: <https://finance.yahoo.com/news/know-top-5-cryptocurrencies-093231173.html> [Accessed 14th March 2023].
8. Wilson-Nunn D., Zenil H. On the Complexity and Behaviour of Cryptocurrencies Compared to Other Markets. Research Gate. Available from: https://www.researchgate.net/publication/268079329_On_the_Complexity_and_Behaviour_of_Cryptocurrencies_Compared_to_Other_Markets [Accessed 14th March 2023].
9. Shcherbina O.A. Udovletvorenie ogranichenii i programmirovaniye v ogranicheniyakh (preprint). Vienna: University of Vienna; 2012. 118 p. (In Russ.).
10. Hentenryck van P. Constraint Satisfaction in Logic Programming. Cambridge: The MIT Press; 1989. 356 p.
11. Stewart I. The great mathematical problems. Moscow: Al'pina non-fikshn; 2015. 460 p. (In Russ.).
12. Razborov A.A. Algebraic complexity. Moscow: Moscow Center for Continuing Mathematical Education; 2016. 32 p. (In Russ.).
13. Fortnow L. The Golden Ticket: P, NP, and the Search for the Impossible. Princeton: Princeton University Press; 2013.
14. Mal'tsev A.I. Algorithms and recursive functions. Moscow: Nauka; 1965. 392 p.
15. Korolkov Yu.D., Mart'yanov V.I. Discrete models: representation by finite trees and solvability of formal theories. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2017. 160 p. (In Russ.).
16. Mart'yanov V.I., Kulik N.I., Pakhomov D.V., Bolshakov E.A. Project of the system to control Irkutsk regional automobile road network. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014;4:118-123. EDN: SBNFNJ.
17. Kulik N.S., Mart'yanov V.I., Pakhomov D.V. Building a motorway graph for the heavy trucks tolling system. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016. № 4 (111). С. 96–101. (In Russ.). EDN: VVSOF.
18. Mart'yanov V.I., Pakhomov D.V., Arkhipov V.V. Network planning of the maintenance of the highway network of the Irkutsk region. *Novye tekhnologii v investitsionno-stroitel'noi sfere i ZhKKh: sb.*

nauch. trudov: in 2 vol. Vol. 1. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2005. p. 123-129. (In Russ.).

19. Martyanov V.I. Set-theoretical data models in the problem of calculating secondary structures of RNA. *System Analysis & Mathematical Modeling*. 2022;4(4):343-357. EDN: VUNLFX. [https://doi.org/10.17150/2713-1734.2022.4\(4\).343-357](https://doi.org/10.17150/2713-1734.2022.4(4).343-357).

20. Martyanov V.I., Korolkov Yu.D. Set-theoretic models of complex systems and algorithms of intellectual support. Irkutsk: Baikal State University; 2020. 188 p. (In Russ.).

21. Martyanov V.I., Katashevsev M.D. Computer processing of distorted video sequences obtained by mobile road laboratories. *Investments, Construction, Real Estate: New Technologies and Special-Purpose Development Priorities: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Irkutsk, 25 April 2019). 2019. Vol. 667. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/667/1/012060>.

22. Martyanov V.I. Set-theory analysis of the data organization and algorithms for net planning with elements artificial intelligence. *Prikladnye problemy diskretnogo analiza: sbornik nauchnyh trudov*.

2021;90-100. (In Russ.). EDN: BVANFU.

23. Leeuwen J.V. Handbook of Theoretical Computer Science. Vol. A, Algorithms and complexity. Amsterdam: Elsevier, 1998. 1020 p.

24. Knuth D. Postscript about NP-hard problems. *ACM SIGACT News*. 1974;6(2):15-16. <https://doi.org/10.1145/1008304.1008305>.

25. Aaronson S. The Scientific Case for P≠NP. *Shtetl-Optimized*. Available from: <https://scottaaronson.blog/?p=1720> (25.09.2016). [Accessed 14th March 2023].

26. Aaronson S. PHYS771 Lecture 6: P, NP, and Friends. *Scott Aaronson.ru*. Available from: <https://www.scottaaronson.com/democritus/lec6.html> [Accessed 14th March 2023].

27. Lawler E.L., Lenstra J.K., Rinnooy Kan A.H.G., Shmoys D.B. The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization, John Wiley & Sons, 1985.

28. Wegener I. Complexity Theory: Exploring the Limits of Efficient Algorithms. Springer, 2005. P. 189. <https://doi.org/10.1007/3-540-27477-4>.

Информация об авторе

Мартьянов Владимир Иванович,
д.ф.-м.н., профессор кафедры
автомобильных дорог,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
Байкальский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, Россия
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Россия
e-mail: MartVilv@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2659-0355>

Information about the author

Vladimir I. Martyanov
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor
of the Department of Highways,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
Baikal State University,
11 Lenin St., Irkutsk 664003, Russia
Irkutsk State University,
1 Karl Marx St., Irkutsk 664003, Russia
e-mail: MartVilv@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2659-0355>

Вклад автора

Автор провел исследование, подготовил рукопись к печати и несет ответственность за плагиат.

Contribution of the author

Autor has conducted the study, prepared the manuscript for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 16.03.2023.
Одобрена после рецензирования 10.04.2023.
Принята к публикации 11.04.2023.

Information about the article

The article was submitted 16.03.2023.
Approved after reviewing 10.04.2023.
Accepted for publication 11.04.2023.

**Влияние насыщения древесины
огнебиозащитными составами на горючесть****В.М. Паршин¹, Д.С. Шалагин², А.А. Баранова³✉**^{1,2,3}Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Россия

Аннотация. Цель работы – установить влияние насыщения древесины сосны огнебиозащитными составами на ее горючесть и оценить огнезащитную эффективность трех видов антипиренов: «Сенеж Огнебио», «Ecossept Огнебио» и «Propitex Огнебиозащита». Составы наносились на образцы двумя способами: путем поверхностной обработки и глубокой пропиткой. Испытания на горючесть проводились методом огневой трубы по стандартной методике. Качество огнебиозащитного состава оценивалось по содержанию пропитки в образцах и по потерям массы обработанных образцов при огневых испытаниях. При поверхностной обработке среднее содержание состава «Сенеж Огнебио» в образцах составило 2,41% по массе, а средние потери массы образцов при сжигании достигли 21,97%. Среднее содержание в образцах антипиренов «Ecossept Огнебио» и «Propitex Огнебиозащита» составило 1,97% и 2,56% по массе, а повреждения образцов при испытании – 28,52% и 28,38% соответственно. После глубокой пропитки среднее содержание пропиточных составов в образцах увеличилось более чем в 2,5 раза и повреждения древесины при испытании составили в среднем для «Сенеж Огнебио» – 14,87%, для «Ecossept Огнебио» – 8,27%, для «Propitex Огнебиозащита» – 11,83%. Экспериментально установлено, что для поверхностной обработки древесины лучшим огнебиозащитным составом является «Сенеж Огнебио», а для глубокой пропитки подходят все три состава.

Ключевые слова: древесина, горючесть, антипирены, огнебиозащитные составы, глубокая пропитка, поверхностная пропитка

Для цитирования: Паршин В.М., Шалагин Д.С., Баранова А.А. Влияние насыщения древесины огнебиозащитными составами на горючесть // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 298–306. <https://elibrary.ru/cxioeh>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-298-306>.

Original article**Influence of wood saturation with fire- and bioprotective
agents on its combustibility****Victor M. Parshin¹, Dmitriy S. Shalagin², Albina A. Baranova³✉**

Angarsk State Technical University, Angarsk, Russia

Abstract. The aim was to establish the effect of pine wood saturation with fire- and bioprotective agents on its combustibility and to evaluate the fireproof efficiency of three types of fire retardants: Senezh OgneBio, Ecossept OgneBio, and Propitex Ognebiozaschita. The compositions were applied onto the samples by surface treatment and deep impregnation. Combustibility tests were carried out by the flame tube method according to a standard technique. The quality of the fire and bioprotective agents was evaluated by the impregnation content in the samples and by the weight loss of the treated samples during combustion tests. In surface-treated samples, the average content of Senezh OgneBio was 2.41 wt% and the average mass loss during combustion reached 21.97%. The average content of Ecossept OgneBio and Propitex Ognebiozaschita fire retardants in the samples was 1.97 and 2.56 wt%, with the average mass loss during combustion reaching 28.52% and 28.38%, respectively. After deep impregnation, the average content of the impregnating compositions in the samples increased by more than 2.5 times, and wood damage during the test was on average 14.87% for Senezh OgneBio, 8.27%

© Паршин В.М., Шалагин Д.С., Баранова А.А., 2023

for Ecossept OgneBio, and 11.83% for Propitex Ognebiozaschita. Senezh OgneBio was experimentally determined to be the best fire- and bioprotective agent for wood surface treatment, although all three compositions were found to be suitable for deep impregnation.

Keywords: wood, combustibility, flame retardants, fire-protective compounds, deep impregnation, surface impregnation

For citation: Parshin V.M., Shalagin D.S., Baranova A.A. Influence of wood saturation with fire- and bioprotective agents on its combustibility. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(2):298-306. (In Russ.). <https://elibrary.ru/cxioeh>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-298-306>.

ВВЕДЕНИЕ

Древесина, являясь материалом природного происхождения, обладает множеством достоинств, таких как: низкая теплопроводность, достаточная прочность при невысокой средней плотности, небольшие затраты на производство, легкость обработки, возможность переработки промышленных отходов. При соответствующих условиях эксплуатации конструкции и изделия на ее основе могут прослужить длительное время. Однако одними из главных ее недостатков являются повышенная воспламеняемость и горючесть. По показателю горючести древесина относится к четвертой группе – сильногорючие, т.е. в сухом состоянии при воздействии открытого огня воспламеняется, поддерживает горение и практически полностью сгорает, что может привести к уничтожению не только материальных ценностей, но и гибели людей.

Исходя из всего вышесказанного, снижение пожарной опасности деревянных конструкций и изделий из древесины является весьма актуальной и значимой задачей, над решением которой трудятся исследователи из разных стран [1–20]. Снижения возгораемости древесины можно добиться путем ее пропитки специальными растворами – антипиренами. Воздействие антипиренов на древесину основано на повышении сопротивления возгоранию и горению. При нагревании антипирен, содержащийся на поверхности древесины, образует пленку, ограничивая тем самым доступ кислорода к поверхности. В результате, часть тепла расходуется на ее плавление, приводя к повышению температуры воспламенения древесины. Некоторые огнезащитные вещества, разлагаясь при нагревании, выделяют газы, не поддерживающие горение (аммиак, сернистый газ). Негорючие вещества, оттесняющие кислород с поверхности древесины, препятствуют ее горению. В настоящее время на рынке пред-

лагается достаточное количество пропиточных составов, которые позволяют повысить стойкость древесины к возгоранию.

Целью работы было установить влияние насыщения древесины огнебиозащитными составами на ее горючесть и оценить огнезащитную эффективность исследуемых антипиренов.

МЕТОДЫ

В исследованиях применялись три огнебиозащитных состава, которые предлагаются торговыми сетями: «Сенеж Огнебио» по ТУ 2389-002-18796270-2003, «Ecossept Огнебио» по ТУ 2499-134-13238275-2016 и «Propitex Огнебиозащита» по ТУ 20.59.50-003-46366385-2017.

Для испытаний из древесины сосны были изготовлены образцы размерами 10х10х100 мм, которые обрабатывались антипиренами двумя способами:

- путем погружения образцов в емкость с антипиреном в течение нескольких секунд за два раза с интервалом в одни сутки – поверхностная обработка;

- выдерживанием (вымачиванием) образцов в емкости с огнебиозащитным составом в течение двух недель – глубокая пропитка. При этом уровень пропиточной жидкости над поверхностью образцов составлял 100 мм.

Обработка образцов огнебиозащитными составами проводилась в лаборатории при температуре воздуха +20 °С и влажности 38%. Обработанные антипиренами образцы высушивались до постоянной массы при комнатной температуре в течение 30 сут.

У каждого образца измерялась масса до и после обработки огнезащитным составом, а также после огневых испытаний с точностью до 0,01 г.

Потери массы образца (Р, %) при испытании определялись по формуле

$$P = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100, \quad (1)$$

где m_1 – масса образца до испытания, г;
 m_2 – масса образца после испытания г.

Перед началом огневых испытаний исследуемые образцы взвешивались. Высота пламени газовой горелки составляла 2–2,5 см. Образец, закрепленный в держателе, устанавливался вертикально и опускался в огневую трубу до касания с пламенем. При соприкосновении образца с огнем с помощью секундомера засекалось время.

Образец находился в вертикальном положении, соприкасаясь с пламенем, в течение 2 мин. По истечении этого времени образец удалялся из зоны огня, и фиксировалось время его самостоятельного горения. После огневых испытаний остывшие до комнатной температуры образцы древесины взвешивались.

По результатам испытаний устанавливалась группа огнезащитной эффективности антипирена. Согласно НПБ 251-98 «Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе. Общие требования. Методы испытаний» к I группе относятся образцы, у которых потери массы не превышают 9%, ко II группе – если потери массы составляют свыше 9% и до 25%. При потере массы более 25% делается вывод, что данное средство не обеспечивает огнезащиту древесины и не является огнезащитным.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты приведены в табл. 1–2 и представлены на рис. 1–3.

Потери массы контрольных образцов (без обработки антипиренами) при огневых испытаниях в среднем составили 59,63%.

При поверхностной обработке (табл. 1) среднее содержание состава «Сенеж Огнебио» в образцах составило 2,41% по массе. При этом средние потери массы образцов при сжигании достигли 21,97%, что соответствует II группе огнезащитной эффективности.

Среднее содержание в образцах антипиренов «Ecosept Огнебио» и «Propitex Огнебиозащита» составило 1,97% и 2,56% по массе, а повреждения образцов при испытании – 28,52% и 28,38% соответственно, что свидетельствует о том, что данные средства при поверхностной обработке не обеспечивают огнезащиту древесины и не являются огнезащитными.

После глубокой пропитки (табл. 2) среднее содержание огнебиозащитных составов в образцах увеличилось более чем в 2,5 раза по сравнению с поверхностной обработкой и повреждения древесины при испытании составили в среднем для «Сенеж Огнебио» 14,87%, для «Ecosept Огнебио» – 8,27%, для «Propitex Огнебиозащита» – 11,83%.

По полученным результатам при глубокой пропитке состав «Ecosept Огнебио» можно отнести к I группе огнезащитной эффективности, а составы «Сенеж Огнебио» и «Propitex Огнебиозащита» – к антипиренам II группы огнезащитной эффективности.

Таблица 1. Результаты испытаний образцов после поверхностной обработки огнебиозащитными составами

Table 1. Test results of samples after surface treatment with fire-bio-protective compounds

Номер образца	Сенеж Огнебио		Ecosept Огнебио		Propitex Огнебиозащита	
	Содержание антипирена, % по массе	Потери массы образца, %	Содержание антипирена, % по массе	Потери массы образца, %	Содержание антипирена, % по массе	Потери массы образца, %
1	1,49	33,37	2,21	9,37	3,13	46,07
2	2,35	16,89	2,46	36,86	1,39	37,92
3	2,00	26,68	2,9	28,32	1,76	2,09
4	2,95	28,83	1,98	30,89	3,48	48,99
5	3,21	33,66	2,98	26,33	1,95	28,61
6	3,07	12,62	2,15	30,23	3,48	8,31
7	1,27	20,79	1,01	38,47	2,38	39,63
8	1,98	24,57	1,52	16,18	2,99	17,44
9	2,89	6,19	1,95	38,34	2,86	18,26
10	2,85	16,13	0,58	30,22	2,14	36,48
Среднее значение	2,41	21,97	1,97	28,52	2,56	28,38

огнебиозащитными составами

Table 2. Test results of samples after deep impregnation with fire-bio-protective compounds

Номер образца	Сенеж Огнебио		Ecosept Огнебио		Propitex Огнебиозащита	
	Содержание антипирена, % по массе	Потери массы образца, %	Содержание антипирена, % по массе	Потери массы образца, %	Содержание антипирена, % по массе	Потери массы образца, %
1	9,53	11,47	3,68	14,68	9,72	8
2	7,64	18,22	6,15	11,79	4,69	28,12
3	7,1	17,06	3,99	7,67	9,57	7,41
4	7,31	18,84	9,02	6,75	5,03	37,52
5	8,58	22,19	8,75	13,84	8,6	7,74
6	4,63	12,43	2,29	1,06	5,23	6,04
7	5,25	13,12	8,51	7,76	5,62	6,17
8	7,54	9,52	8,66	4,99	6,32	3,83
9	6,16	13,23	7,61	5,91	0,79	8,87
10	5,02	12,58	10,18	8,26	10,03	4,56
Среднее значение	6,87	14,87	6,88	8,27	6,56	11,83

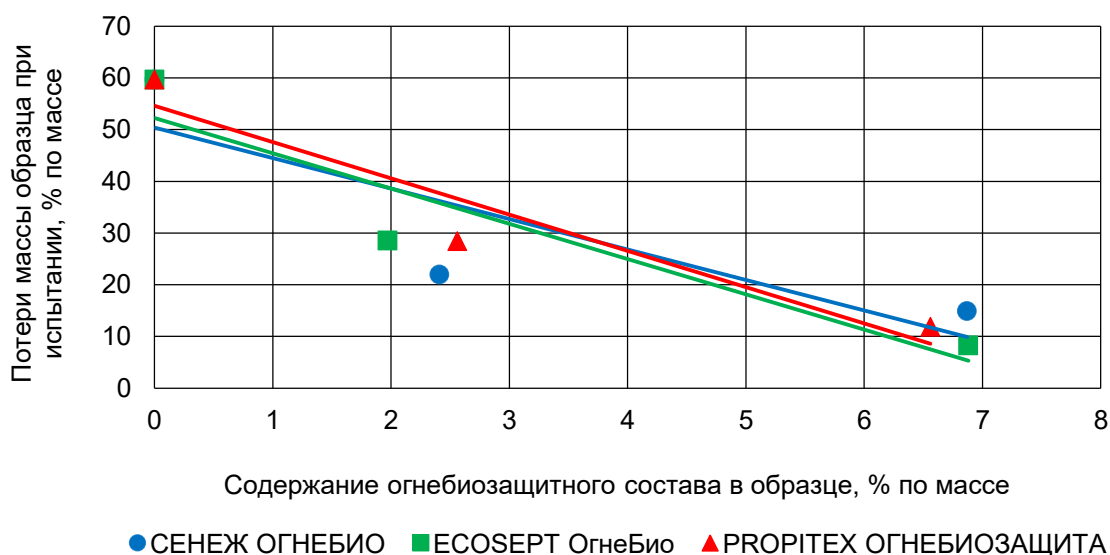


Рис. 1. Горючесть образцов в зависимости от содержания огнебиозащитных составов
Fig. 1. Flammability of samples depending on the content of fire-bio-protective compounds



Рис. 2. Фотографии контрольных образцов до (а) и после (б) огневых испытаний
Fig. 2. Photos of control samples before (a) and after (b) fire tests

Потери массы образцов (P , %) при огневых испытаниях (рис. 1) описываются следующими уравнениями:

– для огнебиозащитного состава «Сенеж ОгнеБио»:

$$P = 50,4 - 5,8978 \cdot x; \quad (2)$$

– для огнебиозащитного состава «Ecosept ОгнеБио»:

$$P = 52,273 - 6,8249 \cdot x; \quad (3)$$

– для огнебиозащитного состава «Propitex Огнебиозащита»:

$$P = 54,59 - 7,01 \cdot x, \quad (4)$$

где x – содержание в древесине огнебиозащитных составов, % по массе.

У контрольных образцов горение началось с первых секунд огневых испытаний и продолжалось после удаления источника огня до полного сгорания (см. рис. 2, *b*).

Горение образцов, поверхностно обработанных составом «Сенеж ОгнеБио», начиналось в среднем через 10 сек. с момента испы-

тания и продолжалось в течение 15 сек. после удаления источника огня (рис. 3, *a*). Горение образцов, поверхностно обработанных составом «Ecosept ОгнеБио», начиналось в среднем через 50 сек. и продолжалось в течение 15 сек. после удаления источника огня (рис. 3, *b*). Горение образцов, поверхностно обработанных составом «Propitex Огнебиозащита», начиналось в среднем через 17 сек. и продолжалось в течение 30 сек. после удаления источника огня (рис. 3, *c*).

Горение образцов, обработанных составом «Сенеж ОгнеБио» методом глубокой пропитки, начиналось в среднем через 70 сек. с момента испытания и прекращалось после удаления источника огня (рис. 4, *a*). Возгорание образцов, обработанных составами «Ecosept ОгнеБио» и «Propitex Огнебиозащита» методом глубокой пропитки, не наблюдалось в течение 120 сек. (рис. 4, *b* и *c*).

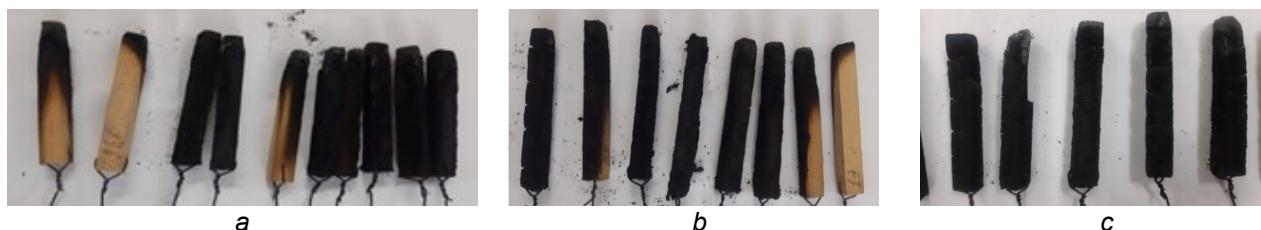


Рис. 3. Образцы, поверхностно обработанные огнебиозащитными составами, после огневых испытаний:

a – Сенеж ОгнеБио; *b* – Ecosept ОгнеБио; *c* – Propitex Огнебиозащита

Fig. 3. Photos of samples superficially treated with fire-protective compounds after fire tests:
a – Senezh Ognеbio; *b* – Ecosept Ognеbio; *c* – Propitex Ognеbiозashchita

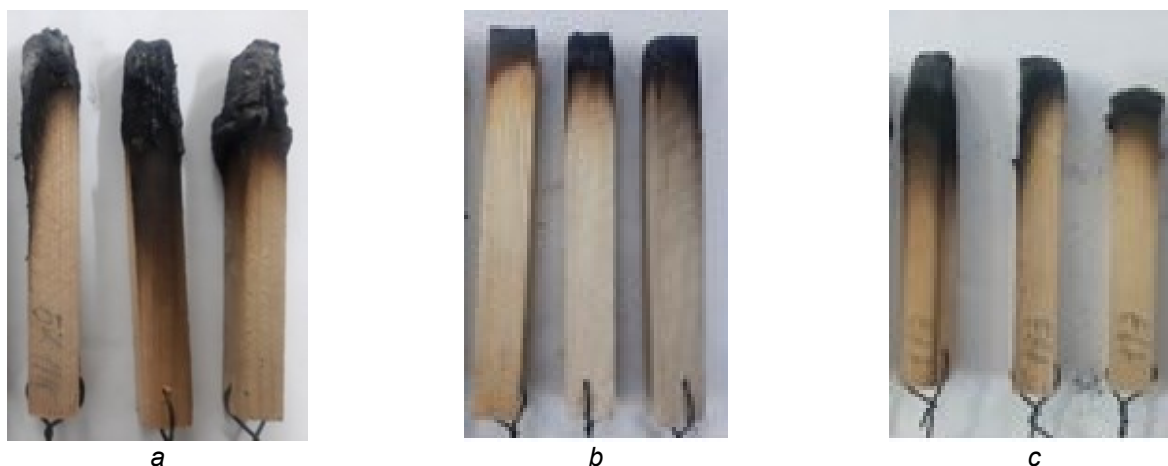


Рис. 4. Образцы, обработанные методом глубокой пропитки огнебиозащитными составами, после огневых испытаний:

a – Сенеж ОгнеБио; *b* – Ecosept ОгнеБио; *c* – Propitex Огнебиозащита

Fig. 4. Samples treated by deep impregnation with fire-protective compounds after fire tests:
a – Senezh Ognеbio; *b* – Ecosept Ognеbio; *c* – Propitex Ognеbiозashchita

ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы:

– для поверхностной обработки древесины лучшим из трех исследуемых огнебиозащитных составов является «Сенеж Огнебио», у которого потери массы образцов при сжигании составили 21,97%, что соответствует II группе огнезащитной эффективности;

– для глубокой пропитки подходят все три состава, при этом по проценту повреждений древесины при огневых испытаниях состав «Еcossept Огнебио» соответствует I группе огнезащитной эффективности, «Сенеж Огнебио» и «Propitex Огнебиозащита» относятся ко II группе огнезащитной эффективности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Luming Li, Zhilin Chen, Jinhan Lu, Ming Wei, Yuxiang Huang, Peng Jiang. Combustion behavior and thermal degradation properties of wood impregnated with intumescent biomass flame retardants: phytic acid, hydrolyzed collagen and glycerol // ACS Omega. 2021. Vol. 6. No. 5. P. 3921–3930. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05778>.
2. Rowell R.M., M.A. Dietenberger. Thermal properties, combustion and fire retardancy of wood. In: Handbook of wood chemistry and wood composites. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. P. 127–150. <https://doi.org/10.1201/b12487>.
3. Kumar S.P., Takamori S., Araki H., Kuroda S. Flame retardancy of clay-sodium silicate composite coatings on wood for construction purposes // RSC Advances. 2015. Vol. 5. No. 43. P. 34109–34116. <https://doi.org/10.1039/C5RA04682C>.
4. Park Hyung-Ju, Kang Young-Goo, Kim Hong. A study on combustion characteristics of fire-retardant treated wood // Journal of the Korean Wood Science and Technology. 2005. Vol. 33. Iss. 4. P. 38–44.
5. Sohyun Park, Yeonjung Han, Dong Won Son. Flame retardancy of wood products by spreading concentration and impregnation time of flame retardant // Korean Wood Science and Technology. 2020. Vol. 48. No. 4. P. 417–430. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2020.48.4.417>.
6. Park Hee-Jun, Mingyu-Wen, Cheon, Sang-Hun, Hwang, Jung-Woo, Oh, Seung-Won. Flame retardant performance of wood treated with flame retardant chemicals // Journal of the Korean Wood Science and Technology. 2012. Vol. 40. Iss. 5. P. 311–318. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2012.40.5.311>.
7. Qiangqiang Liu, Yubo Chai, Lin Ni, Wenhua Lyu. Flame retardant properties and thermal decomposition kinetics of wood treated with boric acid modified silica sol // Materials. 2020. Vol. 13. No. 20. P. 4478. <https://doi.org/10.3390/ma13204478>.
8. Gaff M., Čekovská H., Bouček J., Kačíková D., Kubovský I., Tribulova T., et al. Flammability characteristics of thermally modified meranti wood treated with natural and synthetic fire retardants // Polymers. 2021. Vol. 13. P. 1–13. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15977.21608>.
9. Wang L., Yang Ya., Deng H., Duan W., Zhu J., Wei Yu., et al. Flame retardant properties of a guanidine phosphate-zinc borate composite flame retardant on wood // ACS Omega. 2021. Vol. 6. No. 16. P. 11015–11024. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00882>.
10. Коротков Р.В. Снижение горючести строительных материалов из древесины // Научный вестник воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2009. № 3 (5). С. 166–171. EDN: KUXYJN.
11. Трифонова О.Н. Химическая модификация древесины с целью снижения ее горючести // Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17. № 1. С. 23–25.
12. Трушкин Д.В., Корольченко О.Н., Бельцова Е.Г. Горючесть древесины, обработанной огнезащитными составами // Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17. № 1. С. 29–33.
13. Петрова Е.А. Снижение горючести древесины // Строительные материалы. 2011. № 11. С. 59–61.
14. Саяпина Д.И., Зимина А.Н., Порубенко А.С. Применение огнезащитных покрытий для получения устойчивости древесины в условиях пожара // Студенческий: электронный научный журнал. 2021. № 19-1 (147). С. 38–46. URL: <https://sibac.info/journal/student/147/213852> (24.04.2023).
15. Альяменбаев М.М., Сивенков А.Б. Применение антипиренов для снижения пожарной опасности древесины с лакокрасочными материалами // Олигомеры-2015: сб. тезисов докл. V Междунар. конф.-школы по химии и физико-химии олигомеров (г. Волгоград, 01–06 июня 2015 г.). Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2015. С. 216. EDN: UAJDEX.
16. Савченко Т.А., Панкин К.Е. Экспериментальные исследования эффективности действия ан-

типиринов на воспламенение древесины // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. (г. Саратов, 18–20 мая 2016 г.). Саратов: ООО «Амирит», 2016. С. 75–79. EDN: WXVENH.

17. Рустамов У.И., Аташов А.Ш., Мухамедгалиев Б.А. Исследование горения огнезащитных древесных материалов, модифицированных полимерными антипиренами // Химическая промышленность. 2018. Т. 95. № 4. С. 205–208. EDN: YMHYFV.

18. Абдукадиров Ф.Б., Камалов Ж.К., Касимов И.У., Мухамедгалиев Б.А. Исследование горения огнезащитных древесных материалов, модифицированных полимерными антипиренами //

Химическая промышленность. 2021. Т. 98. № 2. С. 82–86. EDN: ZKNKKL.

19. Копылов Н.П., Кузнецов А.Е., Сушкина Е.Ю., Яшин В.В. Изучение кинетики термической и термоокислительной деструкции обработанной антипиренами и необработанной древесины (часть 2) // Пожарная безопасность. 2020. № 4 (101). С. 55–62. EDN: WFIGJF.
<https://doi.org/10.37657/vniipo.pb.2020.101.4.005>.

20. Газизов А.М., Хазипов А.М., Мяслицин А.В. Повышение огнезащитных свойств древесины при помощи пропитки антипиреном // Нефтегазовое дело. 2022. № 6. С. 7–19.
<https://doi.org/10.17122/ogbus-2022-6-7-19>. EDN: KVECXO.

REFERENCES

1. Luming Li, Zhilin Chen, Jinhan Lu, Ming Wei, Yuxiang Huang, Peng Jiang. Combustion behavior and thermal degradation properties of wood impregnated with intumescent biomass flame retardants: phytic acid, hydrolyzed collagen and glycerol. *ACS Omega*. 2021;6(5):3921–3930.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05778>.

2. Rowell R.M., M.A. Dietenberger. Thermal properties, combustion and fire retardancy of wood. In: *Handbook of wood chemistry and wood composites*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press; 2012. p. 127–150. <https://doi.org/10.1201/b12487>.

3. Kumar S.P., Takamori S., Araki H., Kuroda S. Flame retardancy of clay-sodium silicate composite coatings on wood for construction purposes. *RSC Advances*. 2015;5(43):34109–34116.
<https://doi.org/10.1039/C5RA04682C>.

4. Park Hyung-Ju, Kang Young-Goo, Kim Hong. A study on combustion characteristics of fire-retardant treated wood. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 2005;33(4):38–44.

5. Sohyun Park, Yeonjung Han, Dong Won Son. Flame retardancy of wood products by spreading concentration and impregnation time of flame retardant. *Korean Wood Science and Technology*. 2020;48(4):417–430.
<https://doi.org/10.5658/WOOD.2020.48.4.417>.

6. Park Hee-Jun, Mingyu-Wen, Cheon, Sang-Hun, Hwang, Jung-Woo, Oh, Seung-Won. Flame retardant performance of wood treated with flame retardant chemicals. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 2012;40(5):311–318.
<https://doi.org/10.5658/WOOD.2012.40.5.311>.

7. Qiangqiang Liu, Yubo Chai, Lin Ni, Wenhua Lyu. Flame retardant properties and thermal decomposition kinetics of wood treated with boric acid modified

silica sol. *Materials*. 2020;13(20):4478.
<https://doi.org/10.3390/ma13204478>.

8. Milan Gaff, Hana Čekovská, Jiří Bouček, Danica Kačíková, Ivan Kubovský, Tereza Tribulova, et al. Flammability characteristics of thermally modified meranti wood treated with natural and synthetic fire retardants. *Polymers*. 2021;13:1–13.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15977.21608>.

9. Wang L., Yang Ya., Deng H., Duan W., Zhu J., Wei Yu., et al. Flame retardant properties of a guanidine phosphate-zinc borate composite flame retardant on wood // *ACS Omega*. 2021. Vol. 6. No. 16. P. 11015–11024.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00882>.

10. Korotkov R.V. Reduction of combustibility of wood building materials. *Nauchnyi vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture* (In Russ.). EDN: KUXYJN.

11. Trifonova O.N. Chemical modification of wood in order to reduce its combustibility. *Pozharovzrivo-bezopasnost = Fire and explosion safety*. 2008;17(1):23–25. (In Russ.).

12. Trushkin D.V., Korolchenko O.N., Beltsova T.G. Combustibility of wood treated with flame retardants. *Pozharovzrivo-bezopasnost = Fire and explosion safety*. 2008;17(1):29–33. (In Russ.).

13. Petrova E.A. Reducing the combustibility of wood. *Stroitelnie materiali*. 2011;11:59–61. (In Russ.).

14. Sayapina D.I., Zimina A.N., Porubenko A.S. The use of fire-resistant coatings to increase the stability of wood in fire conditions. *Studencheskii: el-*

elektronnyi nauchnyi zhurnal. 2021;19-1:38-46. (In Russ.).

15. Al'menbaev M.M., Sivenkov A.B. The use of flame retardants to reduce the fire hazard of wood with paint and varnish materials. *Oligomery-2015: sbornik tezisov dokladov V Mezhdunarodnoi konferentsii-shkoly po khimii i fizikokhimii oligomerov = Oligomers-2015: collection of abstracts of the V International Conference-School of Chemistry and Physical Chemistry of oligomers*. 01-06 June 2015, Volgograd. Volgograd: Volgograd State Technical University; 2015. p. 216. EDN: UAJDEX.

16. Savchenko T.A., Pankin K.E. Eksperimental'nye issledovaniya effektivnosti deistviya antipirenov na vosplamnenie drevesiny. *Innovatsii v prirodoobustroistve i zashchite v chrezvychaynykh situatsiyakh: materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Innovations in environmental management and protection in emergency situations: materials of the III International Scientific and Practical Conference*. 18-20 May 2016, Saratov. Saratov: LLC "Amirit"; 2016. p. 75-79. EDN: WXVEHH.

17. Rustamov U.I., Atashov A.Sh., Mukhamedgaliev B.A. Combustion research fire-resistant wood materials modified with polymer antipyrène. *Khimicheskaya promyshlennost'*. 2018;95(4):205-208. (In Russ.). EDN: YMHYFV.

18. Abdukadirov F.B., Kamalov J.K., Kasimov I.U., Mukhamedgaliev B.A.. Combustion research fire-resistant wood materials modified with polymer antipyrène. *Khimicheskaya promyshlennost'*. 2021;98(2):82-86. (in Russ.). EDN: ZKNKKL.

19. Kopylov N.P., Kuznetsov A.E., Sushkina E.Yu., YASHIN V.V. Study of the kinetics of thermal and thermal-oxidative destruction of treated with flame retardants and untreated wood (Part 2). *Pozharnaya bezopasnost' = Fire safety*. 2020;4:55-62. (In Russ.). EDN: WFIGJF.

<https://doi.org/10.37657/vniipo.pb.2020.101.4.005>.
20. Gazizov A.M., Khazipov A.M., Myalitsin A.V. Increasing the fire-proof properties of wood by impregnation with antipyrène. *Neftegazovoe delo*. 2022;6:7-19. (In Russ.). EDN: KVECXO.
<https://doi.org/10.17122/ogbus-2022-6-7-19>.

Информация об авторах

Паршин Виктор Максимович,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Ангарский государственный
Технический университет,
665835, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60, Россия
e-mail: pgs@angtu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3985-4770>

Шалагин Дмитрий Сергеевич,

магистрант,
Ангарский государственный
технический университет,
665835, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60, Россия
e-mail: pgs@angtu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0971-1741>

Баранова Альбина Алексеевна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Ангарский государственный
технический университет,
665835, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60, Россия
e-mail: baranova2012aa@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5939-3334>

Information about the authors

Victor M. Parshin,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Angarsk State
Technical University,
60 Tchaikovsky St., Angarsk 665835, Russia
e-mail: pgs@angtu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3985-4770>

Dmitriy S. Shalagin,

Master's Degree Student,
Angarsk State
Technical University,
60 Tchaikovsky St., Angarsk 665835, Russia
e-mail: pgs@angtu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0971-1741>

Albina A. Baranova,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Angarsk State
Technical University,
60 Tchaikovsky St., Angarsk 665835, Russia
e-mail: baranova2012aa@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5939-3334>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 03.04.2023.
Одобрена после рецензирования 20.04.2023.
Принята к публикации 21.04.2023.

Information about the article

The article was submitted 03.04.2023.
Approved after reviewing 20.04.2023.
Accepted for publication 21.04.2023.



Прогнозирование и оценка эффективности и надежности строительных систем при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций

В.В. Пешков

Иркутский национальный исследовательский университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Целью работы является совершенствование методов организации и управления жизненным циклом объектов капитального строительства на этапе строительства при возникновении чрезвычайных ситуаций в условиях ограничения доступности ресурсов. Актуальность исследования обусловлена тенденцией увеличения на территории страны стихийных и техногенных ситуаций, к которым относятся наводнения. Регистрируемые чрезвычайные ситуации, вызванные наводнениями, указывают на необходимость оптимизации процессов организации строительства в соответствии со своевременным и адекватным реагированием привлекаемых ресурсов для предотвращения последствий чрезвычайных ситуаций, достижение которых возможно с использованием принципов целевой фокусировки процессов организации строительства. В работе систематизированы вызовы и проблемы организации и управления строительством, идентифицированы тенденции, особенности и закономерности организации строительных процессов при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. На основании этого предложены рекомендации по совершенствованию процессов строительства на основе принципов целевой фокусировки при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и обеспечения живучести зданий, подверженных подтоплению паводковыми водами.

Ключевые слова: надежность зданий, жизненный цикл, наводнения, строительный процесс, целостность строительных систем, инженерная устойчивость

Для цитирования: Пешков В.В. Прогнозирование и оценка эффективности и надежности строительных систем при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 307–315. <https://elibrary.ru/wjmfpi>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-307-315>.

Original article

Forecasting and assessment of efficiency and reliability of construction systems during emergency response

Vitaliy V. Peshkov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The aim of the work involves the improvement of management processes during the life cycle of major construction objects, focused on enhancing the efficiency and reliability of construction systems in emergency situations with limited availability of resources. The relevance of the study is stipulated by the increasing trend in natural and man-made disasters on the territory of the Russian Federation, including floods. Registered emergencies associated with floods indicate that it is necessary to optimize the construction management processes through adequate and timely resource allocation in order to prevent and mitigate the consequences of such emergencies, which can be achieved by using the target-focused principles for construction management. The paper systematizes the challenges in construction management and identifies trends, specific features, and regularities of the organization of construction processes in emergency response. Based on this analysis, the recommendations are offered for improving construction processes using the target-focused principles in emergency response and ensuring the fail-safety of buildings exposed to flood waters.

Keywords: building reliability, life cycle, floods, construction process, integrity of building systems, engineering sustainability

For citation: Peshkov V.V. Forecasting and assessment of efficiency and reliability of construction systems during emergency response. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(2):307-315. (In Russ.). <https://elibrary.ru/wjmfpi>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-307-315>.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетных векторов социально-экономического развития Российской Федерации, регламентированным рядом стратегических документов, к которым можно отнести «Концепцию долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2036 года», «Стратегию инновационного развития РФ на период до 2030 года» и «Основные направления деятельности Правительства Российской Федерации на период до 2024 года», является обеспечение граждан РФ доступным и комфортным жильем, отвечающего современным технологическим и экологическим требованиям. Особое значение данная задача приобретает при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, связанных в том числе с разрушениями зданий и сооружений. Вероятность возникновения наводнений может быть вызвана изменением климата, экологическими, социально-экономическими и культурными факторами, совокупное наличие которых увеличивают риск возникновения наводнений. Несмотря на все достижения в разработке средств защиты от наводнений и моделирования наводнений, невозможно полностью устранить опасность наводнений и ущерб от них. Непосредственный риск, связанный с более частыми, непредсказуемыми опасностями и, следовательно, с более серьезными последствиями, подчеркивает необходимость применения альтернативных стратегий управления рисками наводнений и оценки их влияния на жизненный цикл здания, их устойчивость.

МЕТОДЫ

Термин «устойчивость» был впервые введен в области экологии Холлингом в 1973 г. и с тех пор получил популярность в области технических науки и борьбы со стихийными бедствиями. На фундаментальном уровне устойчивость относится к способности систем восстанавливать функциональность после возмущения. Тем не менее, широкое распространение термин «устойчивость» среди дисциплин привело к двусмысленности в отношении окончательного применения концепции. Р. Martin-Breen и А. J. Marti исследовали устойчивость для получения спектра устойчивости возрастающей сложности на основе трех междисциплинарных

структур: инженерной устойчивости, устойчивости систем и устойчивости в комплексно-адаптивных системах [1].

Инженерная устойчивость концептуализируется в качестве возврата к исходному состоянию и определяется как способность противостоять большим помехам без изменения, дезинтеграции или постоянного повреждения, возвращаться в прежнее состояние посредством применения различных работ по восстановлению.

Чтобы выделить ключевые методы, используемые для оценки устойчивости, методы необходимо сгруппировать в количественные и качественные подходы и далее классифицировать. Количественные подходы основаны на методе моделирования и включают в себя использование программного обеспечения для гидравлического моделирования и имитации наводнений как средства анализа живучести зданий [2]. Также могут использоваться другие методы моделирования, такие как моделирование на основе анализа обнаружения изменений. Качественные подходы были признаны доминирующими для измерения устойчивости. Качественные методы менее разнообразны, чем количественные, так как они в основном представляют собой описательные методы – теоретические основы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Действия по снижению риска наводнений могут быть предприняты в любой точке процесса управления чрезвычайными ситуациями и во многом зависят от социально-экономических условий в стране, а также от политики управления рисками [3].

Страны, обладающие финансовыми возможностями и политической волей для инвестирования в крупномасштабную инфраструктуру, могут определять свои стандарты риска наводнений на основе анализа затрат и выгод, где затраты на защиту от наводнений (например, строительство или укрепление дамб) и ожидаемый ущерб (разрушение зданий) сведены к минимуму.

Российская Федерация, имея своеобразные природные и климатические условия, сталкивается с различными стихийными явлениями, вызванными факторами сложного рельефа, об-

ширными географическими площадями. Так за последние пять лет количество чрезвычайных ситуаций, вызванных наводнениями, ежегодно имеет тенденцию роста. В 2017 г. территория Красноярского края была подвержена наводнениям из-за ливневых дождей. Были эвакуированы более 700 чел., несколько дорог и железных дорог были разрушены или повреждены. В 2018 г. Иркутская область подверглась сильному наводнению из-за длительных ливней. Больше 2500 домов было затоплено, эвакуировано около 10 000 чел., погибли 25 чел. В мае 2019 г. понес серьезные потери из-за наводнений пгт. Усть-Карск в Забайкальском крае. Больше 9000 чел. были эвакуированы, множество домов и инфраструктура были повреждены. Опыт ликвидации последствий наводнений в перечисленных выше регионах доказал несоответствие системы управления, прогнозирования и оценки эффективности и надежности строительных систем при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций [5].

Кроме того, в подобных ситуациях, необходимо учитывать специфических условий данной территории, в том числе наличие транспортной инфраструктуры, имеющейся базы по производству строительных материалов и изделий, потенциальные возможности местных проектных и строительных организаций, природно-климатические условия и другие факторы. Таким образом, в условиях чрезвычайных ситуаций, когда в сжатые сроки требуется строительство жилья и других объектов, возникает потребность корректировки основных принципов и закономерностей организации и управления строительством и в том числе организации собственно строительных процессов [6].

Наличие особенностей функционирования строительной отрасли, позволяет определить, что организация строительных процессов зависит от различных условий реализации каждого проекта, что делает направление проектного управления эксклюзивным по сравнению с другими отраслями народного хозяйства (табл. 1).

Табл. 1. Особенности строительных проектов
Table 1. Features of construction projects

Особенности	Характеристика
Комплекс производственных процессов	Уровень производительности в строительстве зависит от передвижения средств производства между различными объектами, а также комплектацией ресурсами этих объектов. Поставка ресурсов на каждый этап работ оказывает влияние на время и стоимость каждого отдельного этапа, а также на стоимость ресурсов на месте строительства. Она также влияет на организацию проекта, коммуникацию, обмен информацией, контроль и надзор, а также на корректировку и модернизацию управленческих решений [7]
Локализация недвижимости	Важно отметить, что закон локализации объекта недвижимости указывает на то, что даже если два здания полностью идентичны и находятся рядом друг с другом, они будут иметь разное значение и воздействие на окружающую среду. На будущие характеристики эксплуатации объекта недвижимости влияют не только природно-климатические, социально-географические и инфраструктурные особенности земельного участка, но и местные стандарты, строительные нормы и правила, а также ряд внутренних рисков и наличие решений по их устранению [8]
Закон замораживания ресурсов	Если средства замораживаются в течение длительного времени, это может привести к увеличению затрат на строительство из-за высоких расходов на ресурсы и материалы. Длительность процесса «разморозки» напрямую влияет на итоговую стоимость проекта и затраты на капитал. Высокое потребление (нерациональное использование) материалов также увеличивает затраты на доставку ресурсов на строительную площадку, а также на хранение излишков заготовленных материалов, их обработку, потери и отходы, связанные с технологическим процессом [9]
Высокая капиталоемкость и длительная окупаемость	Наличие многосубъектности и необходимость диверсификации средств
Многосубъектность	Строительная сфера является самой распространенной для применения методов подрядных отношений. Подрядные отношения включают в себя не только работы, но и интеллектуальные услуги, услуги по проектированию и планированию производства

Вышеперечисленные особенности еще раз подтверждают уникальность управленческой методологии, которая учитывает все особенности строительных проектов.

Организация строительных процессов при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций требует от субъектов обеспечение скоординированной работы как в процессе взаимодействия субъектов, так и внутри каждого строительного процесса [10, 11]. Не вызывает сомнений, что на всех этапах жизненного цикла объекта строительства следует использовать инновационные технологии, методы организации работ, позволяющих производить работы с высоким качеством и минимально возможными затратами, что повысит уровень рентабельности и обеспечит конкурентное преимущество [12]. На основании этого необходимо разработать основы для системного и эффективного процесса организации строительного производства при устранении последствий наводнений с учетом ограниченности временных и материальных ресурсов на основе принципов безопасности, адаптивности, системы менеджмента качества, ресурсосбережения и бережливого производства. Это позволит обеспечить оптимальное распределение всех видов ресурсов, а также предсказать и оценить эффективность и надежность строительных систем при ликвидации чрезвычайных ситуаций. В процессе организации строительных процессов необходимо применять один из четырех подходов – процессный, проектный, функциональный и структурный. При выборе одного из приведенных подходов организации строительных процессов наиболее важным является обеспечение эффективной производственной дея-

тельности при наблюдаемой, открытой и эффективно управляемой системы. При этом под эффективностью организации строительных процессов необходимо понимать способность организационной системы к своевременному реагированию на факторы внешней среды, оказывающих негативное влияние на производственный процесс [13–15].

Для целей оценки эффективности организации строительных процессов необходимо учитывать два основных аспекта (рис. 1):

- систему показателей, направленную на оценку текущего состояния строительного процесса, с той точки зрения, которая обеспечит принятие эффективных управленческих решений на каждом отдельном элементе процесса (на каждом отдельном этапе жизненного цикла);

- набор переменных, от значения которых зависят результаты показателей эффективности различных видов деятельности на каждом этапе строительного процесса.

В этом аспекте необходимо отметить, что строительные процессы представляют собой взаимосвязанную систему реализации проектов по созданию или изменению недвижимости. Такая деятельность чувствительна к условиям внешней и внутренней среды, и процессы организации строительства осуществляются в динамичной среде, которая влияет на результативность работы и качество конечной строительной продукции. Определение проблемных областей, которые оказывают влияние на эффективность процессов организации строительства, целесообразно при рассмотрении системы организации строительных процессов при ликвидации чрезвычайных ситуаций [16–19].



Рис.1. Перечень целенаправленные действий для оценки эффективности строительных процессов
Fig.1. List of targeted actions to assess the effectiveness of construction processes

На этапе строительства жизненного цикла объекта возникает большое количество разнообразных по происхождению и интенсивности проблемных факторов и обстоятельств, которые постепенно становятся рисками проекта, оказывающими многократное влияние в особенности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Комплексный анализ случаев наводнений на территории Иркутской области позволил сформировать перечень мероприятий, которые целесообразно осуществлять на территориях, подверженных чрезвычайным ситуациям природного характера, вызванных наводнением (рис. 2).

Основываясь на приведенных на рис. 2 показателях, можно утверждать, что существует широкий спектр государственных и частных

мер по снижению риска наводнений с различными затратами, эффективностью и временными характеристиками, которые могут быть применены до того как произойдет наводнение [21, 22]. Постоянные меры, такие как дамбы, плотины и насосные станции, являются наиболее часто используемыми для предотвращения наводнений.

Временные меры, напротив, используются либо для уменьшения последствий наводнения (например, эвакуации), либо для уменьшения вероятности наводнения путем увеличения уровней защиты в течение ограниченного периода времени (например, строительство временной дамбы, укрепление существующей дамбы мешками с песком или очистка дренажных каналов) [23].



Рис. 2. Перечень мероприятий на подверженных чрезвычайными ситуациями природного характера территориях
Fig. 2. List of activities in areas prone to natural emergencies

Постоянные меры по предотвращению наводнений разрабатываются на основе статистики экстремальных явлений. Они имеют заранее определенные сроки жизни, и поэтому их часто называют «долгосрочными» мерами. Их общая стоимость в течение срока службы состоит из первоначальных инвестиций в строительство и ежегодных затрат на техническое обслуживание. Они обеспечивают защиту до определенного уровня безопасности, который здесь определяется заданным временем возврата разряда [24]. Как и в случае постоянных мер, временные меры имеют первоначальные затраты (например, приобретение необходимых материалов, установка системы прогнозирования), но также и затраты, связанные с их внедрением. Последние зависят от того, сколько раз инициировано действие. Ущерб от наводнения зависит от того, эффективно ли меры снижают риск наводнения.

ВЫВОДЫ

Общий вывод исследования состоит в том, что управление процессами организации строительства требует корректировки и совершенствования системы. Результаты дея-

тельности в этой отрасли должны быть экономически эффективными и учитывать различные функциональные аспекты, включая технические и экологические вызовы. Также необходимо учитывать необходимость специализации на создание строительной продукции, соответствующей стратегическим целям развития страны и регионов. Важно также учитывать факторы возникновения чрезвычайных ситуаций на заселенных территориях.

В статье подчеркивается активный поиск новых подходов и инструментов для модернизации отраслей экономики, включая инвестиционно-строительную сферу.

Это отрасль играет важную роль не только в старте реализации программ развития, но и на всех ее стадиях, включая ликвидацию чрезвычайных ситуаций, вызванных наводнением, что требует модернизации целевых установок и подходов к организации строительного производства, обеспечивающих возможность прогнозирования и оценки эффективности и надежности строительных систем при ликвидации последствий наводнений и затоплений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Martin-Breen P., Anderies J. Marti. Resilience: a literature review'. Brighton: IDS, 2011. 4 p.
2. Mohamed Sayed Bassiony Ahmed Abd El-Karim, Omar Aly Mosa El Nawawy, Ahmed Mohamed Abdel-Alim. Identification and assessment of risk factors affecting construction projects // HBRC Journal. 2017. Vol. 13. Iss. 2. P. 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2015.05.001>.
3. Арефьева Е.В., Болгов М.В. Особенности прогнозирования природных наводнений в целях снижения риска чрезвычайных ситуаций на примере Краснодарского края // Технологии гражданской безопасности. 2018. Т. 15. № 4 (58). С. 40–47. EDN: VOPZGD. <https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2018.15.4.5.8.6.40>.
4. Игнатенкова В.А. Проблематика прибрежных территорий реки Ангары в пределах Иркутской агломерации: эволюция изменений (конец XVII в. – начало XXI в.) // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 4. С. 704–715. EDN: IPTYYP. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-4-704-715>.
5. Королев В.Ю., Арефьева Е.В., Нефедова Ю.С., Рыбаков А.В., Лазовский Н.А. Прогнозирование рисков наводнений на основе метода оценивания вероятностей превышения критических значений в неоднородных потоках экстремальных событий // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2015. № 1 (24). С. 40–56. EDN: TNCGOF.
6. Безруких О.А., Матвеева М.В. Управление процессами организации строительства при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, вызванных наводнениями // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 3. С. 422–431. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-3-422-431>.
7. Kabanov V.N. Organizational and technological reliability of the construction process // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 77 (1). P. 59–67. <https://doi.org/10.18720/MCE.77.6>.
8. Гинзбург А.В. Организационно-технологическая надежность строительных систем // Вестник МГСУ. 2010. № 4. С. 251–255. EDN: NEJDYB.
9. Сборщиков С.Б., Шинкарева Г.Н., Маслова Л.А., Лейбман Д.М. Оценка эффективности управления реализацией строительного проекта в условиях воздействия случайных факторов // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 11 (110). С. 1240–1247. EDN: YMEBRE. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.11.1240-1247>.
10. Михайлова Е.В. Определение продолжительности возведения зданий и сооружений в условиях неопределенности // Строительное производство. 2020. № 1. С. 12–16. EDN: LLMNFV. https://doi.org/10.54950/26585340_2020_1_12.
11. Лапидус А.А. Влияние современных техно-

логических и организационных мероприятий на достижение планируемых результатов строительных проектов // Технология и организация строительного производства. 2013. № 2. С. 1. EDN: RDIYCF.

12. Paslawski J. Flexible approach for construction process management under risk and uncertainty // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 208. P. 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.028>.

13. Козлова Е.А. Инновационные методы в строительстве и их влияние на продолжительность строительного производства // Вестник современных исследований. 2018. № 12.5 (27). С. 165–168. EDN: YSQSGL.

14. Агеев С.В., Подрезов Ю.В., Романов А.С., Тимошенко З.В. Особенности выполнения мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций природного характера // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2020. № 1. С. 116–120. EDN: TRMNVQ. <https://doi.org/10.36535/0869-4176-2020-01-12>.

15. Роздобутько Д.А. Конструктивное решение малоэтажных зданий возводимых в прибрежных районах // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2023. № 2 (1062). С. 35–37. EDN: MFMHAT.

16. Масляев А.В. О безопасности массовых жилых и общественных зданий при опасных природных воздействиях // Жилищное строительство. 2021. № 1-2. С. 40–49. EDN: XJAAVO. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-1-2-40-49>.

17. Масляев А.В. Населенные пункты России не защищены от воздействия опасных природных явлений // Жилищное строительство. 2019. № 5. С. 36–42. EDN: HWKYTM. <https://doi.org/10.31659/0044-44722019-5-36-42>.

18. Иштрякова Т.Р. Сравнение отечественного и зарубежного подходов к управлению жизненным циклом объектов строительства // Актуальные вопросы современной экономики.

2020. № 5. С. 296–301. EDN: PVOJMX. <https://doi.org/10.34755/IROK.2020.55.78.073>.

19. Матвеева М.В., Козьма М.В. Механизм повышения рейтинга ESG-факторов жизненного цикла инвестиционно-строительного проекта // *Baikal Research Journal*. 2022. Т. 13. № 3. С. 25. EDN: LVJKEL. [https://doi.org/10.17150/2411-6262.2022.13\(3\).25](https://doi.org/10.17150/2411-6262.2022.13(3).25).

20. Градинарь М.Г. Управление строительными процессами с помощью моделирования их параметров // *Globus*. 2020. № 3 (49). С. 27–28.

21. Кривогино Д.Н., Алакина С.В., Алакин Д.Э. Построение модели комплексного оценивания альтернативных характеристик строительной системы (на примере автотранспортных тоннелей) // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. Т. 10. № 2. С. 220–227. EDN: IJEUPJ. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-2-220-227>.

22. Медяник Ю.В. Совершенствование системы инжиниринга инвестиционно-строительной деятельности // Вопросы инновационной экономики. 2019. Т. 9. № 2. С. 501–514. <https://doi.org/10.18334/vinec.9.2.40704>.

23. Грабовый П.Г., Старовойтов А.С. Проблемы индивидуального жилищного строительства в России и возможные пути их решения // Недвижимость: экономика, управление. 2019. № 1. С. 94–103. EDN: RDDPDV.

24. Каракозова И.В. Исследование универсальной последовательности строительных работ // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 9. С. 1321–1333. EDN: PORILC. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.9.1321-1333>.

25. Морозенко А.А., Воронков И.Е. Проблемы оценки повышения надежности элементов организационной структуры инвестиционно-строительного проекта // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 12. С. 30–32. EDN: TBVEHR.

REFERENCES

1. Martin-Breen P., Anderies J. Marti. Resilience: a literature review'. Brighton: IDS; 2011. 4 p.

2. Mohamed Sayed Bassiony Ahmed Abd El-Karim, Omar Aly Mosa El Nawawy, Ahmed Mohamed Abdel-Alim. Identification and assessment of risk factors affecting construction projects. *HBRC Journal*. 2017;13(2):202-216. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2015.05.001>.

3. Arefieva E.V., Bolgov M.V. Specifics of natural flood forecast for disaster risk reduction. case study of Krasnodar krai. *Tekhnologii grazhdanskoi bezopasnosti*. 2018;15(4):40-47. (In Russ.). EDN: VOPZGD. <https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2018.15.4.58.6.40>.

4. Ignatenkova V.A. Problems associated with

coastal areas of the River Angara within the Irkutsk agglomeration: history of changes from late 17th to early 21st century. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(4):704-715. (In Russ.). EDN: IPTYYP. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-4-704-715>.

5. Korolev V.Yu., Aref'eva E.V., Nefedova Yu.S., Rybakov A.V., Lazovskii N.A. Forecasting of risks of floods on the ground of method of estimating of probabilities of exceeding of critical values within non-ordinary streams of extreme events. *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoi zashchity*. 2015;1:40-56. (In Russ.). EDN: TNCGOF.

6. Bezrukikh O.A., Matveeva M.V. Managing construction processes in emergency response to floods. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(3):422-431. (In Russ.). EDN: MYJDSA. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-3-422-431>.
7. Kabanov V.N. Organizational and technological reliability of the construction process. *Magazine of Civil Engineering*. 2018;77(1):59-67. <https://doi.org/10.18720/MCE.77.6>.
8. Ginzburg A.V. Organizational and technological reliability of construction systems. *Vestnik MGSU*. 2010;4:251-255. (In Russ.). EDN: NEJDYB.
9. Sborshchikov S.B., Shinkareva G.N., Maslova L.A., Leybman D.M. Evaluation of effectiveness of managing construction project realization under the influence of random factors. *Vestnik MGSU*. 2017;12(11):1240-1247. (In Russ.). EDN: YMEBRE. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.11.1240-1247>.
10. Mikhaylova E.V. Determining the duration of construction of buildings and structures under uncertainty. *Stroitel'noe proizvodstvo = Construction production*. 2020;1:12-16. (In Russ.). EDN: LLMNFV. https://doi.org/10.54950/26585340_2020_1_12.
11. Lapidus A.A. The influence of modern technological and organizational actions for achievement of the planned results of the construction projects. *Tekhnologiya i organizatsiya stroitel'nogo proizvodstva*. 2013;2:1. (In Russ.). EDN: RDIYCF.
12. Paslawski J. Flexible approach for construction process management under risk and uncertainty. *Procedia Engineering*. 2017;208:114-124. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.028>.
13. Kozlova E.A. Innovative methods in construction and their impact on the duration of construction production. *Vestnik sovremennykh issledovaniy*. 2018;12.5:165-168. (In Russ.). EDN: YSQSGL.
14. Ageev S.V., Podrezov J.V., Romanov A.S., Timoshenko Z.V. Features of formation and main characteristics of avalanches on the territory of the Russian Federation. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsii = Safety and emergencies problems*. 2020;1:116-120. (In Russ.). EDN: TRMNVQ. <https://doi.org/10.36535/0869-4176-2020-01-12>.
15. Rozdobut'ko D.A. Constructive solution of low-rise buildings erected in coastal areas. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki*. 2023;2:35-37. (In Russ.). EDN: MFMHAT.
16. Maslyayev A.V. About the safety of mass residential and public buildings in case of dangerous natural influences. *Zhilishchnoe stroitel'stvo = Housing construction*. 2021;1-2:40-49. (In Russ.). EDN: XJAAVO. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-1-2-40-49>.
17. Maslyayev A.V. Russian settlements are not protected against the impact of natural hazards. *Zhilishchnoe stroitel'stvo = Housing construction*. 2019;5:36-42. (In Russ.). EDN: HWKYTM. <https://doi.org/10.31659/0044-44722019-5-36-42>.
18. Ishtyakova T.R. Comparison of domestic and foreign approaches to managing the life cycle of construction objects. *Aktual'nye voprosy sovremennoi ekonomiki = Actual issues of the modern economy*. 2020;5:296-301. (In Russ.). EDN: PVOJMX. <https://doi.org/10.34755/IROK.2020.55.78.073>.
19. Matveeva M.V., Kozma M.V. Mechanism for increasing rating of ESG-factors of construction investment life cycle. *Baikal Research Journal*. 2022;13(3):25. (In Russ.). EDN: LVJKEL. [https://doi.org/10.17150/2411-6262.2022.13\(3\).25](https://doi.org/10.17150/2411-6262.2022.13(3).25).
20. Gradinar' M.G. Management of construction processes by modeling their parameters. *Globus*. 2020;3(49):27-28. (In Russ.).
21. Krivogina D.N., Alakina S.V., Alakin D.E. Model for integrated assessment of alternative characteristics of a building system (on the example of road tunnels). *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2020;10(2): 220-227. (In Russ.). EDN: IJEUPJ. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-2-220-227>.
22. Medyanik Yu.V. Improvement of the engineering system of investment and construction activities. *Voprosy innovatsionnoi ekonomiki = Russian journal of innovation economics*. 2019;9(2):501-514. (In Russ.). EDN: SAHKWW. <https://doi.org/10.18334/vinec.9.2.40704>.
23. Grabovyy P.G., Starovoitov A.S. Problems of individual housing construction in Russia and possible solutions. *Nedvizhimost': ekonomika, upravlenie = Real estate: economics, management*. 2019;1:94-103. (In Russ.). EDN: RDDPDV.
24. Karakozova I.V. Issledovanie universal'noi posledovatel'nosti stroitel'nykh rabot. *Vestnik MGSU*. 2020;15(9):1321-1333. (In Russ.). EDN: PORILC. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.9.1321-1333>.
25. Morozenko A.A., Voronkov I.E. Problems of estimating and improving the reliability of elements of organizational structure of an investment and construction project. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2014;12:30-32. (In Russ.). EDN: TBVEHR.

Информация об авторе**Пешков Виталий Владимирович**

д.э.н., профессор,
директор института архитектуры,
строительства и дизайна,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: pvv@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-7999-0999>

Information about the author**Vitaly V. Peshkov**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Director of the Institute of Architecture,
Construction and Design,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: pvv@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-7999-0999>

Вклад автора

Автор провел исследование, подготовил
рукопись к печати и несет ответственность
за плагиат.

Contribution of the author

Autor has conducted the study, prepared
the manuscript for publication and bears
the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта инте-
ресов.

Conflict of interests

The author declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

Автор прочитал и одобрил окончательный ва-
риант рукописи.

The final manuscript has been read and approved
by the author.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 13.02.0023.
Одобрена после рецензирования 03.03.2023.
Принята к публикации 06.03.2023.

Information about the article

The article was submitted 13.02.0023.
Approved after reviewing 03.03.2023.
Accepted for publication 06.03.2023.



Проектное прогнозирование эксплуатационной надежности сооружений в суровых климатических условиях

Б.И. Пинус

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. На основании системного анализа физических закономерностей взаимодействия внешней низкотемпературной среды и железобетонных конструкций и его последствий предложен графоаналитический алгоритм коррекции нормативных функциональных зависимостей показателей эксплуатационной пригодности по условиям обеспечения требуемой надежности в расчетный срок эксплуатации. Динамическая модель работы конструкции рассматривается в форме совокупности статических испытаний на различных этапах низкотемпературных стандартизованных воздействий. При этом временной фактор анализируется в виде относительного (к марке по морозостойкости) количества циклов, что позволяет получить статистическое обобщение различных испытаний. Контролируемые параметры надежности обоснованы методами статистического анализа с учетом изменчивости всех параметров, входящих в нормативные критериальные модели. При этом их чувствительность и информационная представительность оценивается апробированными методами вероятностного прогноза. Экспериментально подтверждена технико-экономическая приемлемость и целесообразность предлагаемого подхода к коррекции обеспечения параметрической надежности изгибаемых железобетонных конструкций. Выполнены статистически представительные экспериментальные исследования с автоматической фиксацией всех значимых параметров сопротивления на различных этапах истощения ресурса усталостной структурной трансформации конструктивных элементов «северного исполнения». Получена картотека графических зависимостей отказных значений прочности изгибаемых элементов в полях рассеивания различного уровня их армирования и в различных температурно-влажностных климатических условиях. Подтверждено существенное влияние температур и внутреннего сопротивления на параметрические отказы конструктивных элементов априорно установленной обеспеченности (вероятности).

Ключевые слова: эксплуатационная надежность, динамическая модель, морозная деградация

Для цитирования: Пинус Б.И. Проектное прогнозирование эксплуатационной надежности сооружений в суровых климатических условиях // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 316–323. <https://elibrary.ru/mupnbe>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-316-323>.

Original article

Design forecasting of serviceability of structures in harsh climatic conditions

Boris I. Pinus

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. By using system analysis, which examines the physical laws of the interaction between external low-temperature environments and reinforced concrete structures, along with their resulting consequences, a graphical-analytical algorithm is proposed in order to adjust the standard functional relationships of serviceability indicators, thereby ensuring the required reliability within the designated service life. The analysis of structural behaviour was carried out through a dynamic model, which involves a combination of static tests at different stages of standardized low-temperature actions. In this case, the time factor was analysed in the form of a relative (to the frost-resistance grade) number of

cycles, enabling the statistical compilation of various tests. The controlled reliability parameters were substantiated by the methods of statistical analysis with due regard for the variability of all the parameters within the standard criteria models. Here, their sensitivity and representativeness were assessed using approved probabilistic forecast methods. The technical and economic feasibility of the proposed approach for adjusting the parametric reliability of bending reinforced concrete structures was experimentally confirmed. Statistically significant experimental studies were carried out with automatic registration of all significant resistance parameters during various stages of fatigue-induced structural transformations of the elements intended for arctic service. A catalogue, containing graphical relationships of ultimate tensile strength values for bending elements within dispersion fields at different levels of reinforcement and under varying temperature-humidity climatic conditions, was compiled. The research findings confirm the significant influence of temperature and internal resistance on the parametric failures of structural elements having previously established reliability (probability).

Keywords: operational reliability, dynamic model, frost degradation

For citation: Pinus B.I. Design forecasting of serviceability of structures in harsh climatic conditions. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2023;13(2):316-323. (In Russ.). <https://elibrary.ru/mupnbe>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-316-323>.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с современной методологией проектирования сооружений¹, их надежность отождествлена с вероятностью наступления расчетных предельных состояний в форме функциональных параметрических отказов.

В отсутствие статистически представительных данных об отказах элементов сооружений в неблагоприятных условиях эксплуатации необходимый проектный ресурс работоспособности может быть обоснован коррекцией расчетных значений сопротивления материалов, учитывающей физические и статистические закономерности их изменения. При этом корректируемые и контролируемые параметры должны обладать повышенной чувствительностью к вероятному отказу, кинетике изменения и приемлемыми возможностями обеспечения информационно-статистической представительности. С учетом существующей практики проектирования, эксплуатации и контроля отбор контролируемых параметров целесообразно производить по критериям стандарта и рекомендаций² с использованием расчетных динамических моделей. Принципиальное отличие последних от соответствующих нормативных функциональных зависимостей состоит в наличии временных (время, циклы) и статистических факторов распределения значимых параметров отклика конструкций, априори принимаемых как случай-

ные величины. В качестве примера практической реализации такого подхода ниже приведен графоаналитический алгоритм коррекции нормативной функциональной модели прочности изгибаемых железобетонных элементов сооружений, эксплуатируемых в суровых климатических условиях.

МЕТОДЫ

Динамическая модель эксплуатации конструкций в суровых климатических условиях рассматривается в виде совокупности статических испытаний по истечении определенного количества циклов (N) температурно-влажностных ($T-W$) воздействий. Ее приемлемость следует из принципа Бейли [1–4], соответствие которого для рассматриваемых условий подтверждено экспериментально [5–7]. Предпочтительная периодичность испытаний определяется физическими закономерностями морозной деструкции бетона как нестационарного процесса экстремального вида [8–12].

С учетом специфики контроля и стандартизированных показателей качества, а также возможности обобщения многочисленных экспериментальных данных временной фактор анализируется в виде относительного количества циклов $T-W$ воздействий ($n = N / F$) [13].

Контролируемые параметры надежности установлены вероятностным моделированием с применением критерияльных нормативных уравнений несущей способности и стандартизированных показателей их изменчивости

¹ГОСТ Р ИСО 2394-2016. Конструкции строительные. Основные принципы надежности // Гарант [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/71911912/> (07.01.2023).

²ГОСТ 27.201.81. Оценка показателей надежности при малом числе наблюдений с использованием дополнительной информации. Рекомендации по использованию дополнительной информации // StandartGOST. URL: https://standartgost.ru/g/ГОСТ_27.201-81 (07.01.2023).

(допусков). Сопоставительная динамика при Ц30 прочностных и деформативных свойств устанавливалась экспериментально³.

В качестве опытных контролируемых показателей надежности изгибаемых элементов по критериям стандарта [3] приняты призмная прочность бетона $R_b(n)$ и его предельная деформативность $\varepsilon_{bu}(n)$, оцениваемые по совокупности случайных реализаций на отдельных этапах испытаний. При этом долговечность конструкций соответствует количеству циклов, по истечению которых вероятность снижения $R_b(n)$ находится в пределах установленного допуска (СП, СНиП, ГОСТ) составляет 99,7%.

Необходимая коррекция расчетного сопротивления бетона из условия обеспечения надежности по несущей способности изгибаемого элемента на срок эксплуатации, соответствующей ресурсу морозостойкости, устанавливается графоаналитическим методом в следующей последовательности.

Функциональная модель прочности изгибаемого элемента по нормальному сечению в параметрах случайных реализаций преобразуется к виду

$$\tilde{R}_b = \frac{\tilde{\sigma}_e^2 A_s^2}{R\tilde{b}(\tilde{\sigma}_e \tilde{A}_s \tilde{h}_0 - \tilde{M}_0)}$$

где $\tilde{M}_0$ – совокупность случайных значений несущей способности элемента в предположении стандартизированной изменчивости всех параметров нормативной зависимости.

Аналитическим моделированием определяются отказные значения прочности бетона R_{ba} , соответствующие вероятности параметрического отказа элемента по несущей способности не более 0,3%. При этом рассматриваются варианты различного уровня армирования (от минимального до максимально ожидаемого) и изменчивости (от стандарта до прогнозируемого). На основании анализа строятся графики зависимости вероятности параметрического отказа ($\alpha = 0,3\%$) от принятого армирования и дисперсии прочности бетона. Одновременно рассматриваются различные варианты коррекции снижения расчетного значения при оценке проектного значения несущей способности M_0 .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже представлены кривые изменения отказного (по условию надежности) значения прочности бетона для 2-х вариантов армирования и различных коэффициентов изменчивости показателя прочности бетона

(рис. 1 и 2). Наглядно подтверждается существенное влияние уровня армирования ($\mu' = \mu/\mu_R$) и статистических показателей распределения на величину отказного значения прочности бетона R_{ba} , косвенно характеризующего надежность конструкции по несущей способности. Здесь же приведены графики риска отказа при двух наиболее распространенных вариантах коррекции расчетного значения $\gamma_{bf} = 0,85$ и 0,7. Наблюдается неоднозначность эффекта корректирующих процедур от относительного (к граничному) уровня армирования и плотности распределения прочности бетона. Полученная картотека графических зависимостей отказных значений R_{ba} в полях рассеивания μ' принята базовой для косвенной оценки надежности железобетонных конструкций “северного исполнения” по результатам стандартных испытаний призматических образцов на сжатие после циклического замораживания и оттаивания различной интенсивности. Температурно-влажностным воздействиям (-42°C и оттаивание воды $20 \pm 2^\circ\text{C}$) подвергнуты около ста образцов бетона нормального твердения (Ц:П:Щ:В = 1:1,75:2,9:0,45). Периодически образцы испытывались на сжатие в режиме постоянства скорости деформирования (0,05 мм/с) с автоматическим контролем деформаций (диаграмм σ - ε). Количество одновременно испытываемых призм (12–18 штук) позволяло получать статистически достоверные данные обоснованных показателей распределения [8–10, 13–18] прочности бетона на этапах исчерпания нормируемого ресурса его морозостойкости. Используя опытные значения статистик и картотеку отказных значений прочности по условиям обеспечения требуемой надежности конструкций (не менее 0,07), устанавливались средние значения R_{ba} для изгибаемых элементов с различным относительным уровнем армирования μ' (таблица). Как и следовало ожидать, отказное значение прочности бетона, рассматриваемое как критерий обеспечения необходимой надежности по несущей способности нормального сечения, зависит от уровня армирования и является чувствительным показателем к условиям внешнего воздействия. Наблюдается его монотонное возрастание с увеличением армирования и практическая стабилизация при $\mu' = 0,85\mu_R$. Аналогичные тенденции сохраняются и во временном аспекте вплоть до момента исчерпания ресурса нормируемой морозостойкости бетона F.

³Пинус Б.И. Обеспечение долговечности железобетонных конструкций при низкотемпературных воздействиях: дисс. ... д-ра. техн. наук. Иркутск, 1986. 495 с.

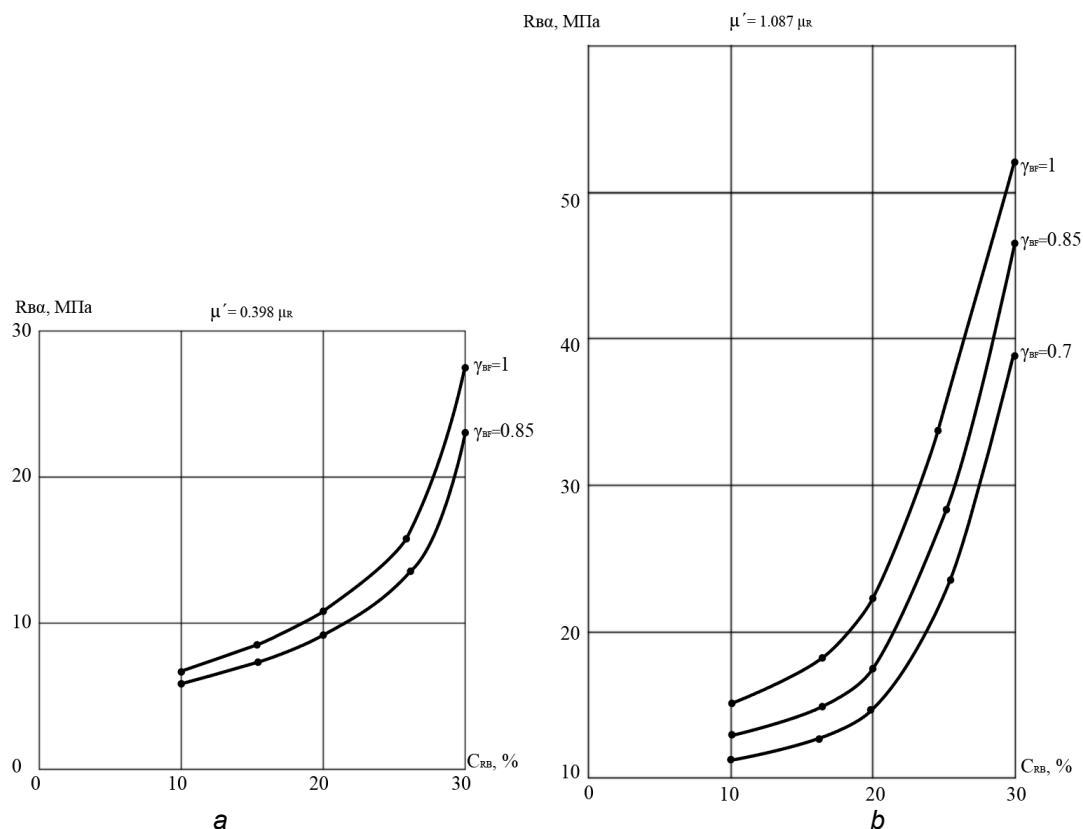


Рис. 1. Изменение $R_{b\alpha}$ в поле рассеивания коэффициента вариации прочности бетона при относительном армировании: $a - \mu' = 0,398 \mu_R$; $b - \mu' = 1,087 \mu_R$
Fig. 1. Change of $R_{b\alpha}$ in the dispersion field of the coefficient of variation of concrete strength under relative reinforcement: $a - \mu' = 0,398 \mu_R$; $b - \mu' = 1,087 \mu_R$

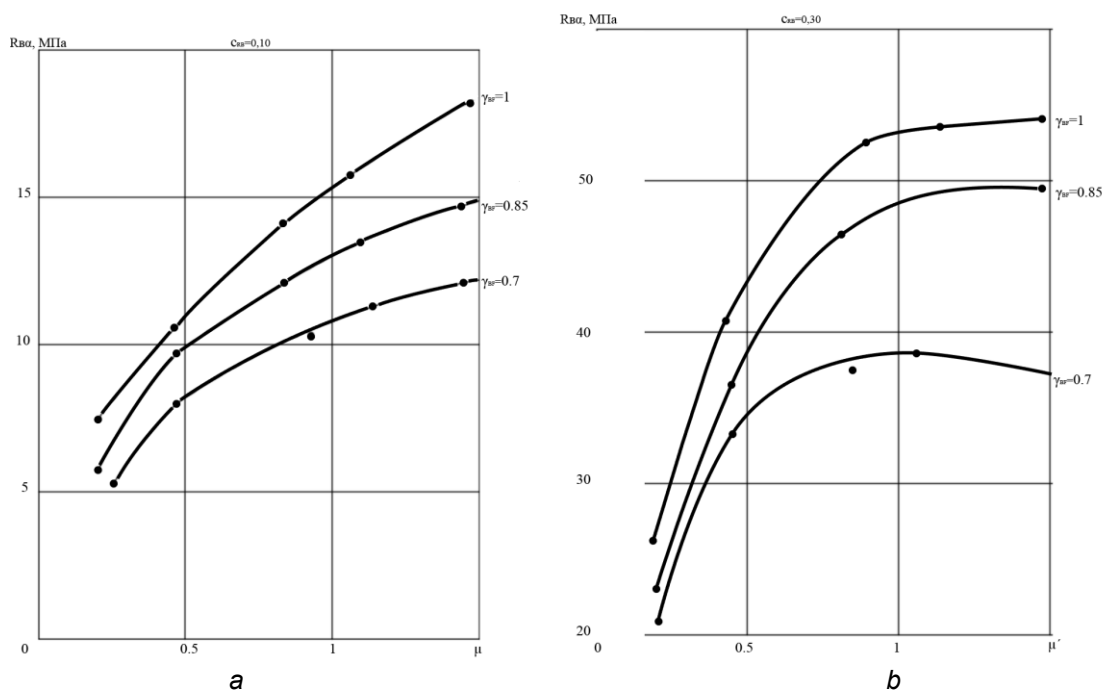


Рис. 2. Изменение $R_{b\alpha}$ для изгибаемых элементов различного уровня армирования при коэффициенте вариаций прочности бетона: $a - C_{Rb} = 10\%$; $b - C_{Rb} = 30\%$
Fig. 2. Change of $R_{b\alpha}$ for bent elements of different reinforcement levels with a coefficient of variations in concrete strength: $a - C_{Rb} = 10\%$; $b - C_{Rb} = 30\%$

Изменение при ЦЗО отказного значения R_{ba}
Change in the failure value of R_{ba} at the CFT

n	Статистики распределения прочности бетона		γ_{bF}	Отказное значение R_{ba} для изгибаемых элементов с μ' , равное				
	Среднее $R_b(n)$, МПа	Коэффициент изменчивости $C_v R_b$, %		0,181	0,398	0,833	1,087	1,449
0	24,0	12,5	1	7,5	11,9	15,4	15,6	16,0
0,29	24,5	14,2	1	8,1	12,8	16,6	16,8	17,1
0,86	20,2	20,7	1	11,8	18,1	23,6	23,8	24,3
			0,85	—	—	21,0	21,3	22,2
			0,70	—	—	17,0	17,4	19,8
1,0	19,7	23,4	1	14,5	22,1	28,8	29,6	29,9
			0,85	—	20,4	24,8	25,1	27,3
			0,70	—	18,2	20,8	21,7	24,9
1,29	19,1	27,0	1	20,0	38,6	38,6	39,2	41,6
			0,85	17,4	33,4	33,3	35,3	38,2
			0,70	—	29,0	29,0	30,5	34,8

Сопоставительная оценка статистик распределения $R_b(n)$ и R_{ba} позволяет утверждать, что на начальных этапах циклических Т-В воздействий ($n \leq 0,3$) расчетная функциональная модель норм ($\gamma_F = 1,0$) обеспечивает требуемый уровень надежности по прочности нормального сечения для всего анализируемого диапазона армирования. Простая интерполяция приведенных данных показывает, что в дальнейшем ($n > 0,3$) риск параметрического отказа может превышать допустимый уровень (0,3%) в элементах с $\mu' = (0,4-0,45)\mu_R$.

На наш взгляд, сказывается принципиальное различие основных предпосылок нормативного (детерминированного) метода определения несущей способности и вероятностно-статистического прогноза долговечности.

Первый предполагает наличие граничной высоты сжатой зоны ε_R , что при заданном армировании априори исключает возможность двойственного характера [19–25] параметрического отказа.

Второй постулирует вероятность различного типа разрушения, обусловленного статистическими закономерностями совместного распределения значимых показателей конструктивных свойств арматуры и бетона, т.е. параметрические отказы вследствие разрушения сжатой зоны до достижения текучести растянутой арматуры вполне вероятны при армировании существенно ниже граничного (μ_R). С увеличением μ его вероятность растёт, что и под-

тверждается динамикой отказного значения R_{ba} . Подтверждается необходимость дифференцированной коррекции расчетного сопротивления с учетом установленных закономерностей и с целью обеспечения необходимого уровня надежности конструкции на период эксплуатации в суровых климатических условиях, соответствующих ее морозостойкости.

Приведенные в таблице данные свидетельствуют о возможности достижения паритета $R_b(n)$ и R_{ba} путем приемлемого снижения расчетного значения на 15–30% ($\gamma_F = 0,85-0,7$). При этом уровень армирования изгибаемых элементов не должен превышать $0,8\mu_R$. Не трудно убедиться в том, что обеспечение надежности более армированных сечений сопряжено с экономически проблематичным снижением расчетного сопротивления и нуждается в соответствующем обосновании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом физических и статистических закономерностей морозной деструкции бетона и железобетона [5, 7, 26–30], температуры среды эксплуатации (Т) и конструктивных особенностей элементов (μ') предлагается, в первом приближении, коррекция критериального уравнения несущей способности введением коэффициента надежности бетона

$$\gamma_{bF} = (1 - 0,0075T) \cdot (1,36 - 0,48\mu') \leq 1. (2)$$

При этом значение $\gamma_{bF} = 1-0,5$ при расчетной температуре до -60°C и $\mu' \leq 1,2\mu_R$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Li W.T., Sun W., Jiang J.Y. Damage of Concrete Experiencing Flexural Fatigue Load and Closed Freeze/thaw Cycles Simultaneously // *Concrete and building materials*. 2011. No. 25 (5). P. 2604–2610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.007>.
2. Soroushian P., Elzafraney M. Damage Effects on Concrete Performance and Microstructure // *Cement and concrete composites*. 2004. No. 26 (7). P. 853–859. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.05.001>.
3. Shang H.S., Song Y.P. Experimental study of strength and deformation of plain concrete under biaxial compression after freezing and thawing cycles // *Cement and Concrete Research*. 2006. No. 36. P. 1857–1864. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.018>.
4. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
5. Актуганов И.З., Пушкин А.А. Экспериментальная проверка принципа линейность суммирования повреждений бетона при действии нестационарных знакопеременных циклов. В кн.: Вопросы надежности железобетонных конструкций. Куйбышев, 1972. С. 5–8.
6. Важенин В.В. К вопросу о морозостойкости бетона и железобетона. В кн.: Вопросы надежности железобетонных конструкций. Челябинск, 1966. С. 197–199.
7. Гладков В.С. О разрушении гидротехнического бетона при многократном замораживании и оттаивании в нестационарном режиме // *Труды координационных совещаний по гидротехнике*. 1972. Вып. 73. С. 133–142.
8. Пинус Б.И., Пинус Ж.Н., Хомякова И.В. Изменение конструктивных свойств бетонов при охлаждении и замораживании // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 2 (97). С. 111–116. EDN: TKOKYR.
9. Pinus B.I. Consideration of cumulative effects on concrete structures at low temperatures impact. In: *Investment, Construction, Real Estate: New technologies and special-purpose development priorities: International scientific conference // MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 212. P. 01025.212:01025. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821201025.2018>.
10. Трофимов Б.Я., Погорелов С.Н. Исследование деформации бетона в процессе циклического замораживания. В кн.: Работоспособность строительных материалов при воздействии различных эксплуатационных факторов. Казань, 1986. С. 79–82.
11. Penttala V., Al-Neshawy F. Stress and strain state of concrete during freezing and thawing cycles // *Cement and concrete research*. 2002. Vol. 32. No. 9. P. 1407–1420. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00785-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00785-8).
12. Minhoto M.J.C., Pais J.C., Fontes L.P.T.L. Evaluation of Fatigue Performance at Different Temperatures // *2nd Workshop on Four Point Bending*. Pais (ed.). University of Minho. 2009. P. 217–230.
13. Pinus B.I., Pinus Z.N. Probabilistic analysis of the strength and reliability of reinforced concrete structures under low-temperature impact // *Investment, construction, real estate: new technologies and special-purpose development priorities: International scientific conference (ICRE-2018) (Irkutsk, 26–27 April 2018)*. MATEC Web of conferences. 2018. Vol. 212. P. 01026. EDN: WTWZMC. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821201026>.
14. Ueda T., Hasan M., Nagai K., Sato Ya., Wang L. Mesoscale Simulation of Influence of Frost Damage on Mechanical Properties of Concrete // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2009. Vol. 21. No. 6. P. 244–252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:6\(244\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:6(244)).
15. Fagerlund G. Mechanical Damage and Fatigue Effects Associated with Freeze-thaw of Materials // *Proceeding 2nd International RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete*. 2002. P. 117–132.
16. Hasan M., Okuyama H., Sato Y., Ueda T. Stress-strain model of concrete damaged by freezing and thawing cycles // *Journal of advanced concrete technology*. 2004. Vol. 2 No. 1. P. 89–99. <https://doi.org/10.3151/jact.2.89>.
17. Li W., Sun W., Jiang J. Damage of concrete experiencing flexural fatigue load and closed freeze/thaw cycles simultaneously // *Construction and building materials*. 2011. Vol. 25 No. 5. P. 2604–2610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.007>.
18. Cicekli U., Voyiadjis G. Z., Abu Al-Rub R. K. A Plasticity and Anisotropic Damage Model for Plain Concrete // *International Journal of Plasticity*. 2007. Vol. 23 No. 10-11. P. 1874–1900. <https://doi.org/10.1016/J.IJPLAS.2007.03.006>.
19. Михайлов К.В. Новое о прочности железобетона. М.: Стройиздат, 1977. 272 с.
20. Гвоздев А.А. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций. М., 1978. 202 с.
21. Litvan G.G. Frost Action in Cement Paste // *Materials and Structures*. 1973. Vol. 6. No. 4. P. 293–298.
22. Setzer M.J. Micro-ice-lens formation in porous solid // *Journal of colloid and interface science*. 2001. Vol. 243. No. 1. P. 193–201. <https://doi.org/10.1006/jcis.2001.7828>.
23. Scherer G W. Crystallization in Pores // *Cement and concrete research*. 1999. Vol. 29. No. 8. P. 1347–1358. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00002-2).

24. Fagerlund G. The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete // *Materials and structures*. 1977. Vol. 10. No. 4. P. 217–229.
 25. Fagerlund G. The International Cooperative Test of the Critical Degree of Saturation Method of Assessing the Freeze/Thaw Resistance of Concrete // *Materials and Structures*. 1977. Vol. 10. No. 4. P. 231–253.
 26. Philleo R.E. Freezing and thawing resistance of high-strength concrete // *NCHRP Synthesis of Highway Practice*; Transportation Research Board. Washington: National Research Council, 1986. 31 p.

27. Shang H., Song Y., Ou J. Behavior of air-entrained concrete after freeze-thaw cycles // *Acta mechanica solida sinica*. 2009. Vol. 22. P. 261–266. [https://doi.org/10.1016/S0894-9166\(09\)60273-1](https://doi.org/10.1016/S0894-9166(09)60273-1).
 28. Van de Veen V. Properties of concrete at very low temperatures: A surveys of the literature. Delft: Delft University of Technology, 1987. 123 p.
 29. Powerst T.C. A Working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete // *Journal of ACI*. 1945. Vol. 16. No. 4. P. 245–272. <https://doi.org/10.14359/8684>.
 30. Powers T.C., Helmuth R.A. Theory of volume change in hardened portland cement pastes during freezing // *Proceedings of the Highway Research Board*. 1953. Vol. 32. P. 285–297.

REFERENCES

1. Li W.T., Sun W., Jiang J.Y. Damage of Concrete Experiencing Flexural Fatigue Load and Closed Freeze/thaw Cycles Simultaneously. *Concrete and Building Materials*. 2011;25(5):2604-2610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.007>.
 2. Soroushian P., Elzafraney M. Damage Effects on Concrete Performance and Microstructure. *Cement and Concrete Composites*. 2004;26(7):853-859. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.05.001>.
 3. Shang H.S., Song Y.P. Experimental study of strength and deformation of plain concrete under biaxial compression after freezing and thawing cycles. *Cement and concrete research*. 2006;36:1857-1864. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.018>.
 4. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics. Moscow: Stroyizdat; 1996. 416 p. (In Russ.).
 5. Aktuganov I.Z., Pushkin A.A. Experimental verification of the principle of linearity of summation of concrete damages under the action of non-stationary alternating cycles. In: *Questions of reliability of reinforced concrete structures*. Kuibyshev, 1982. p. 5-8 (In Russ.).
 6. Vazhenin V.V. On the issue of frost resistance of concrete and reinforced concrete. In: *Questions of reliability of reinforced concrete structures*. Chelyabinsk, 1966. p.197-199. (In Russ.).
 7. Gladkov V.S. On the destruction of hydraulic concrete during repeated freezing and thawing in a non-stationary mode. *Trudy koordinatsionnykh soveshchaniy po gidrotekhnike*. 1972; 73:133-142. (In Russ.).
 8. Pinus B.I., Pinus Zh.N., Khomyakova I.V. Change in concrete structural properties under cooling and freezing. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk state technical university*. 2015; 2:111-116. (In Russ.). EDN: TKOKYR.
 9. Pinus B.I. Consideration of cumulative effects un concrete structures at low temperatures impact. In: *Investment, Construction, Real Estate: New Technologies and Special-Purpose Development Priori-*

ties: International Scientific Conference. MATEC Web of Conferences. 2018;212:01025. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821201025>.
 10. Trofimov B.Ya., Pogorelov S.N. Investigation of concrete deformation during cyclic freezing. In: *The efficiency of building materials under the influence of various operational factors*. Kazan; 1986. p. 79-82. (In Russ.).
 11. Penttala V., Al-Neshawy F. Stress and Strain State of Concrete During Freezing and Thawing Cycles. *Cement and concrete research*. 2002;32:1407-1420. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00785-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00785-8).
 12. Minhoto M.J.C., Pais J.C., Fontes L.P.T.L. Evaluation of Fatigue Performance at Different Temperatures. In: *2nd Workshop on Four Point Bending*. Pais (ed.). University of Minho; 2009. p. 217–230.
 13. Pinus B.I., Pinus Z.N. Probabilistic analysis of the strength and reliability of reinforced concrete structures under low-temperature impact. In: *Investment, construction, real estate: new technologies and special-purpose development priorities: International scientific conference (ICRE-2018)*. MATEC Web of conferences. 26-27 April 2018, Irkutsk. 2018. Vol. 212. p. 01026. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821201026>. EDN: WTWZMC.
 14. Ueda T., Hasan M., Nagai K., Sato Ya., Wang L. Mesoscale Simulation of Influence of Frost Damage on Mechanical Properties of Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2009;21(6):244-252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:6\(244\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:6(244)).
 15. Fagerlund G. Mechanical damage and fatigue effects associated with freeze-thaw of materials. In: Setzer M.J., Auberg R., Keck H.-J. (Eds.). *International RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete*. 2002. p. 117-132.
 16. Hasan M., Okuyama H., Sato Y. et al. Stress-Strain Model of Concrete Damaged by Freezing and Thawing Cycles. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2004;2(1):89-99.

<https://doi.org/10.3151/jact.2.89>.

17. Li W., Sun W., Jiang J. Damage of concrete experiencing flexural fatigue load and closed freeze/thaw cycles simultaneously. *Construction and Building Materials*. 2011;25(5):2604-2610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.007>.
18. Cicekli U., Voyiadjis G. Z., Abu Al-Rub R. A plasticity and anisotropic damage model for plain concrete. *International Journal of Plasticity*. 2007;23(10-11):1874-1900. <https://doi.org/10.1016/J.IJPLAS.2007.03.006>.
19. Mikhailov K.V. New about the strength of reinforced concrete. Moscow: Stroizdat; 1977. 272 p. (In Russ.).
20. Gvozdev A.A. New in the design of concrete and reinforced concrete structures. Moscow; 1978. 202 p. (In Russ.).
21. Litvan G.G. Frost Action in Cement Paste. *Materials and Structures*. 1973;6(4):293-298.
22. Setzer M.J. Micro-ice-lens formation in porous solid. *Journal of colloid and interface science*. 2001;243(1):193-201. <https://doi.org/10.1006/jcis.2001.7828>.
23. Scherer G.W. Crystallization in Pores. *Cement and concrete research*. 1999;29(8):1347-1358. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00002-2).

Информация об авторе

Пинус Борис Израилевич,

д.т.н., профессор, профессор
кафедры строительного производства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: pinus@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-3067-9478>

Вклад автора

Автор провел исследование, подготовил рукопись к печати и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 22.02.2023.
Одобрена после рецензирования 21.03.2023.
Принята к публикации 23.03.2023.

24. Fagerlund G. The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. *Materials and structures*. 1977;10(4):217-229.
25. Fagerlund G. The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. *Materials and structures*. 1977;10(4):231-253.
26. Philleo R.E. Freezing and thawing resistance of high-strength concrete. In: NCHRP Synthesis of Highway Practice; Transportation Research Board. Washington: National Research Council; 1986. 31 p.
27. Shang H., Song Y., Ou J. Behavior of air-entrained concrete after freeze-thaw cycles. *Acta mechanica solida sinica*. 2009;22:261-266. [https://doi.org/10.1016/S0894-9166\(09\)60273-1](https://doi.org/10.1016/S0894-9166(09)60273-1).
28. Van de Veen V. Properties of concrete at very low temperatures: A surveys of the literature. Delft: Delft University of Technology; 1987. 123 p.
29. Powerst T.C. A Working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. *Journal of ACI*. 1945;16(4):245-272. <https://doi.org/10.14359/8684>.
30. Powers T.C, Helmuth R.A. Theory of volume change in hardened portland cement pastes during freezing. *Proceedings of the Highway Research Board*. 1953;32:285-297.

Information about the author

Boris I. Pinus,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor
of the Department of Building Production,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: chupinvr@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-3067-9478>

Contribution of the author

Autor has conducted the study, prepared the manuscript for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Information about the article

The article was submitted 22.02.2023.
Approved after reviewing 21.03.2023.
Accepted for publication 23.03.2023.

**Развитие систем автоматизированного управления на этапе строительства
(на примере линейных объектов)****П.Д. Севастьянов^{1✉}, А.В. Казаков²,
М.В. Матвеева³, А.В. Пешков⁴**^{1,2}ООО «Иркутская нефтяная компания», г. Иркутск, Россия^{3,4}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Цель – совершенствование производственных процессов на основе технологий информационного моделирования и исследование 3D-системы *Trimble Grade Control* при строительстве линейных объектов; определение экономической эффективности данной системы, скорости и качества выполнения работ, а также создание на базе технологий 3D-нивелирования и 3D-проектирования системы автоматизированного управления дорожным строительством, построение имитационной модели. Исследована система автоматизированного управления. Рассчитан экономический эффект применения проекта 3D-нивелирования при реконструкции участка федеральной автодороги «Вилуй» с подготовкой основания под укладку асфальта. Установлено, что экономическая эффективность повысилась благодаря увеличению скорости и повышению качества выполняемых работ. Показана работа системы автоматизированного управления при строительстве линейных объектов. Изучены технологии информационного моделирования. Проведена характеристика системы процессов строительства линейных объектов. Выявлены эффекты и преимущества при использовании технологии 3D-нивелирования в производстве дорожно-строительного управления: 3-кратное повышение скорости и качество финишных планировочных работ; исключение переделок объекта (только в случае изменения проекта); отказ от разбивочных геодезических работ; интерактивный подсчет объемов земляных работ; повышение эффективности работы производителя. Внедрение технологий информационного моделирования позволяет усовершенствовать модель организации производственных процессов. Теоретические и экспериментальные исследования, разработка новых технических решений, проектов новых конструкций машин и рабочих органов – актуальные направления в совершенствовании машин для строительства линейных объектов.

Ключевые слова: автоматизированное управление, линейные объекты, технологические процессы, 3D-система, спутниковый GNSS-приемник, экскаватор, грейдер, бульдозер

Для цитирования: Севастьянов П.Д., Казаков А.В., Матвеева М.В., Пешков А.В. Развитие систем автоматизированного управления на этапе строительства (на примере линейных объектов) // Известия вузов. Строительство. 2023. Т. 13. № 2. С. 324-335. <https://elibrary.ru/lkqvvg>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-324-335>.

Original article**Development of automated control systems at the construction stage
(using the example of linear objects)****Pavel D. Sevastyanov^{1✉}, Andrey V. Kazakov²,
Maria V. Matveeva³, Artem V. Peshkov⁴**^{1,2}Irkutsk Oil Company LLC, Irkutsk, Russia^{3,4}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The research is aimed at improving production processes using information modeling technologies, along with the examination of the Trimble 3D Grade Control system for the construction of

linear facilities; determining the economic efficiency of this system, the speed and quality of work; creating an automated control system for road construction on the basis of 3D leveling and 3D design technologies, and developing a simulation model. An automated control system is investigated. The economic effect of 3D leveling during the reconstruction of the section of the Vilyui federal highway, which involved the preparation of the base for asphalt paving, is calculated. It is established that economic efficiency is increased due to an increase in the speed and quality of the work. The operation of the automated control system during the construction of linear facilities is demonstrated. The technologies of information modeling are studied. The process system during the construction of linear facilities is characterized. The article reveals several effects and advantages of incorporating 3D leveling technology into road construction management, including a threefold increase in the speed and quality of finishing planning works, the prevention of unnecessary reconstruction (only in the case of project modifications), the elimination of demarcation survey operations, real-time computation of earthwork quantities, and enhanced efficiency for the chief engineer. The implementation of information modeling technologies helps to improve the management model of production processes. Both theoretical and experimental research, as well as the development of new technical solutions and designs for machines and working bodies, comprise topical directions in the improvement of machines for the construction of linear facilities.

Keywords: automated control, linear objects, technological passages, 3D-method, satellite GNSS-receiver, excavator, grader, bulldozer

For citation: Sevastyanov P.D., Kazakov A.V., Matveeva M.V., Peshkov A.V. Development of automated control systems at the construction stage (using the example of linear objects). *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(2):324-335. (In Russ.). EDN: LKQVDG. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-324-335>.

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизированные системы постоянно совершенствуются в направлении интеллектуализации процесса строительства линейных и площадных объектов. Разработка новых технических решений, теоретические и экспериментальные исследования, разработка проектов новых конструкций машин, рабочих органов является актуальным направлением в совершенствовании машин для строительства линейных объектов [1–2]. Цель работы – исследование системы 3D-нивелирования Trimble Grade Control при строительстве линейных объектов, экономическая эффективность данной системы, скорость и качество выполнения работ, изучение технологий, применяемых в сфере информационного моделирования в строительстве линейных объектов [3–7]. С целью исследования основных процессов строительства линейных и площадных объектов была построена имитационная модель. Для повышения качества, точности и скорости дорожно-строительных работ, процессов планирования и в целом контроля работы дорожно-строительной техники (ДСТ), авторами предложена идея создания системы автоматизированного управления (САУ) дорожным строительством на базе технологий 3D-нивелирования и 3D-проектирования [8–10]. Сущность данной системы базируется на трех

основных компонентах:

- разработка геопривязанной 3D-модели проекта [11];
- создание облачной системы хранения, через которую 3D-модель проекта будет удаленно загружаться в ДСТ, а также будут организованы функции интерактивного приема и передачи данных о ее фактической работе [12];
- установка на ДСТ комплекта высокоточных геодезических приемников и инклиметрических датчиков, за счет которых ДСТ будет видеть и определять положение своего рабочего органа относительно загруженной 3D-модели на местности и с возможностью перехода на автоматизированный режим работы [13].

Данные системы сегодня активно развиваются и применяются в дорожном строительстве во всем мире, устанавливаются на различную ДСТ: экскаваторы, бульдозеры, грейдеры, укладчики бетона и асфальта (рис. 1) [14].

В целом сегодня широкое применение получили два вида таких систем:

1. На базе установки роботизированных тахеометров – более дорогая технология, но при этом более точная (точность измеряется в миллиметрах).
2. Второй тип – это система, оснащенная GNSS-приемниками – менее точная, более дешевая (точность до 5 см) [15–17].

Удалённый контроль техники

Принцип работы технологии



Рис. 1. Возможности 3D-нивелирования на стройплощадке
Fig. 1. Possibilities of 3D-leveling on the construction site

Остальная технологическая часть и принцип приема геодезических поправок от базовой геодезической станции у данных видов систем – общий [18]. В основной комплект 3D-систем входят: гидравлический комплект, датчики, которые отвечают за уклон и компенсацию наклона мачты, бортовой планшет, в котором хранится вся рабочая информация, проекты, осевые линии, отметки, а также, как говорилось выше, 2 вида комплектов геодезического оборудования [19–21].

В настоящее время все чаще встречается такое оборудование, как 3D-системы автома-

тического управления дорожно-строительными машинами (САУ ДСМ) [22]. Эти системы используются при устройстве земляного полотна дороги бульдозерами и экскаваторами, при профилировании слоев дорожной одежды автогрейдерами [23]. Обслуживание систем выполняется только сервисным инженером (техническим специалистом) компании-поставщика [24]. На данный момент таких не так много, поскольку устанавливать, настроить и грамотно обучить ИТР и машинистов компании-заказчика могут не все (рис. 2, а–с)¹ [25, 26].



Рис. 2. Строительная техника, оснащенная 3D-системой автоматического управления дорожно-строительными машинами: а – выемка непригодного грунта до проектных отметок; б – отсыпка дорожной одежды до проектных отметок; с – устройство выемки экскаватором до проектных отметок

Fig. 2. Construction equipment equipped with a 3D automatic control system for road construction machines: а – excavation of unsuitable soil to the design marks; б – filling of the pavement to the design marks; с – the device of excavation by the excavator to the design marks

Сегодня в мире существует множество производителей таких систем, европейского, японского и китайского производства. В России на сегодняшний день наиболее известны системы нивелирования таких компаний, как *Trimble*, *Leica* и *Topcon* [27].

Так, например, 3D-системами *Trimble Grade Control* оснащена ДСТ в ООО «Иркутская нефтяная компания» (ООО «ИНК»). Ее на отечественном рынке до 2022 г. представляла компания *Saitek*.

По опыту использования данных систем при производстве работ на объектах ООО «ИНК», системы нивелирования *Trimble* зарекомендовали себя надежно. Они стабильны в работе, более просты в подключении

и настройке, легко управляется, а скорректировать работу под нужные высотные отметки дорожно-строительной техники в соответствии с результатами датчиков уклона и высоты можно бортовым компьютером или джойстиком машиниста.

При этом исключаются ошибки, вызванные влиянием «человеческого фактора», особенно при выполнении финишных планировочных работ в ночное время суток, достигается удовлетворяющая точность работы и это позволяет значительно увеличить производительность и минимизировать расходы на инертных материалах, ГСМ, а также на рабочей силе [28, 29].

В целом в Дорожно-строительном управлении ООО «ИНК» на данный момент реали-

¹Латышенко К.П. Автоматизация измерений, контроля и испытаний. М.: Academia, 2018. 160 с.

зована следующая технологическая платформа, включающая в себя большой стек взаимосвязанных технологий.

Основные компоненты программно-аппаратного комплекса дорожно-строительного управления (ДСУ) представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные компоненты программно-аппаратного комплекса

Table 1. The main components of the software and hardware complex

Компонент программно-аппаратного комплекса – ДСУ	Описание
3D CAD (САПР)	Система автоматизированного 3D моделирования и проектирования
АСУ ДСУ	Автоматизированная система фактического учета и планирования
КОМБАТ	Интеллектуальная транспортная система автоматизированного управления дорожно-строительной техникой
3D нивелирование	Автоматизированное управление техникой и строительным процессом

Для того чтобы система работала на объекте, создается специализированная техническая инфраструктура, основными компонентами которой являются:

- установка базовой геодезической станции.

- развертывание телекоммуникационного оборудования для быстрой передачи производственных данных (офис-поле, поле-офис).

Проектировщики работают с двухмерными моделями объектов строительства.

Это техническая документация, планы, чертежи. BIM проектирование кардинально отличается от традиционных видов проектных работ: отличие – в сборе и обработке данных о технологических, архитектурно-

планировочных, конструктивных, эксплуатационных характеристиках объекта, объединенных в едином информационном поле (BIM-модели) [30–32].

Рассмотрим эффективность применения проекта 3D-нивелирования при реконструкции участка федеральной автомобильной дороги (а/д) «Вилуй» с подготовкой основания под укладку асфальта (табл. 2).

Задача производителя работ / мастера ДСУ – выполнить реконструкцию участка федеральной а/д «Вилуй» с подготовкой основания под укладку асфальта (рис. 3).

Протяженность участка – 1,3 км, требуемые сроки реализации – 21 календарный день, требуемое качество работ – +/- 2 см.



Рис. 3. Процесс строительства федеральной автомобильной дороги «Вилуй»:

a – выемка реконструируемого участка автодороги до проектных отметок;

b – подготовленное основание для устройства дорожной одежды

Fig. 3. The process of construction of the federal highway «Vilyuy»:

a – excavation of the reconstructed section of the highway to the design marks;

b – the prepared base for the device of the road surface

При строительстве данного объекта из-за постоянного трафика движения машин по дороге, работы были осложнены очень стесненными условиями, в связи с чем единственным выходом было – организовать работу захватками (работа захватками значительно увеличивает объем разбивочных работ, а постоянное движение машин создает риск сбить планировочные колья). Дополнительно к этому одновременно требовалось вести и контролировать работу еще на двух серьезных объектах со сложной планировкой – откос ГФУ, а также противопожарные проезды ШРС КПХиО СУГ. Благодаря применению системы 3D-нивелирования нам удалось сделать и передать основание подрядной организации в срок (20 дней), с соблюдением точности +/- 2 см от проекта. Выданный в работу GNSS-приемник с загруженной 3D-моделью и техника, оснащенная 3D-системой, помогли нам оперативно «на месте» решать споры со службой заказчика, службой строительного контроля и смежными подрядными организациями, и доказывать качество и точность выполненной планировки. При использовании техники, оснащенной системой 3D-нивелирования,

разбивка площадки и дорог кольями не требуется. При сравнительном анализе производительности и организации работ ДСУ ООО «ИНК» и смежной подрядной организации, на участке федеральной автомобильной дороги А-331 «Вилуй» задействовано со стороны ДСУ ООО «ИНК» три единицы дорожно-строительной техники в двухсменном режиме в комплексе с одним дорожным мастером, а со стороны смежной подрядной организации было задействовано 17 единиц дорожно-строительной техники в двухсменном режиме в комплексе с 13 ИТР, из них: главный инженер, начальник участка, семь дорожных мастеров, две бригады геодезистов (геодезист + замерщик) (табл. 3).

Срок выполнения работ ДСУ ООО «ИНК» составил 20 календарных дней на участке в 1,3 км дороги (рис. 4).

Таблица 2. Окупаемость инвестиции в системы 3D-нивелирования

Table 2. Recoupment of 3D leveling systems

Норма за смену, м³	Производительность, %
690	100
1100	162

Таблица 3. Сравнение производительности и организации работ дорожно-строительного управления ООО «Иркутская нефтяная компания» с подрядной организацией*

Table 3. Comparison of productivity and organization of works of LLC «INK» with a contractor*

	Участок федеральной АД «Вилуй»		Межплощадочная АД ИЗП	
ИТР состав	Дорожный мастер (параллельно вел еще два объекта: ГФУ откос, пожарные проезды КПХиО СУГ) Итого: 1 чел.		1. Главный инженер 2. Начальник участка 3. Семь мастеров (на линии) 4. Две бригады геодезистов (геодезист + замерщик) Итого: 13 чел.	
Задействованная техника	1 3D экскаватор 1 3D бульдозер 1 грунтовый каток	1 звено	7 экскаваторов 6 бульдозеров 2 катка 1 3D грейдер 1 грейдер	6 звеньев
Срок Выполнения работ	20 дней с учетом постоянного трафика по федеральной а/д и работы «захватками»		Около одного года	
Качество выполненных работ	Вертикальная планировка поверхности была выполнена с допуском + \ - 2 см без работы грейдера. Дорога находится в <u>удовлетворительном состоянии</u> после двух сезонов прохода температуры через 0 градусов, регулярного транзитного трафика и «зимнего завоза»		Дорога находится в <u>неудовлетворительном состоянии</u> после двух сезонов прохода температуры через 0 градусов и в отсутствии регулярного использования	

*после выполнения ДСУ объекта – участок реконструкции федеральной автодороги «Вилуй» – строительная подрядная организация закупила пять комплектов систем 3D-нивелирования для тяжелой техники марки Торсон у ООО «Байкал-Оптика».

Строительство межплощадочной АД ИЗП подрядной организации составило около года.

Выявленные эффекты и преимущества при использовании в производстве работ ДСУ технологии 3D-нивелирования:

- 3-кратное повышение скорости и качество финишных планировочных работ;
- исключение переделок объекта (только в случае изменения проекта);
- отказ от разбивочных геодезических работ;

– интерактивный подсчет объемов земляных работ;

– повышение эффективности работы мастера/производителя работ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследована система автоматизированного управления при строительстве линейных объектов. Рассчитан экономический эффект применения проекта 3D-нивелирования при реконструкции участка федеральной автодороги «Вилюй» с подготовкой основания под укладку асфальта.



Рис. 4. Участок федеральной автомобильной дороги «Вилюй», расстояние 1,3 км

Fig. 4. Section of the federal highway "Vilyuy", distance 1.3 km

Показана возможность применения систем 3D-нивелирования при реконструкции участка федеральной а/д «Вилюй» с подготовкой основания под укладку асфальта. Применение систем 3D-нивелирования позволит ООО «ИНК» оперировать огромными массивами памяти, способствует повышению скорости и качества финишных планировочных работ,

исключению переделок объекта, отказу от разбивочных геодезических работ, интерактивному подсчету объемов земляных работ.

Благодаря применению системы 3D-нивелирования удалось сделать и передать основание подрядной организации в срок (20 дней) с соблюдением точности +/-2 см от проекта (рис. 5).



Рис. 5. Перевозка основного крупногабаритного оборудования на стройплощадку завода полимеров

Fig. 5. Transportation of the main large-sized equipment to the construction site of the polymer

ВЫВОДЫ

Исследована 3D-система *Trimble Grade Control* и технологии информационного моделирования. Проведена характеристика системы процессов строительства линейных объектов в ООО «ИНК». С целью совершенствования процессов организации строительства линейных объектов в ООО «ИНК» предполагается внедрение технологии информационного моделирования. Выявлены эффекты и преимущества при использовании в производстве

работ ДСУ технологии 3D-нивелирования:

1. 3-кратное повышение скорости и качества финишных планировочных работ.

2. Экономическая эффективность данной системы.

3. Исключение переделок объекта (только в случае изменения проекта), отказ от разбивочных геодезических работ, интерактивный подсчет объемов земляных работ, повышение эффективности работы мастера / производителя работ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hu Z.Z., Leng S., Lin, J.R., Li S.-W., Xiao Y.-Q. Knowledge extraction and discovery based on BIM: a critical review and future directions // Archives of Computational Methods in Engineering. 2022. Vol. 29. P. 335–356. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09576-9>.
2. Nguyen V., Zhang J., Le V., Jiao R. Vibration analysis and modeling of an off-road vibratory roller equipped with three different cab's isolation mounts // Shock and Vibration. 2018. Vol. 2018. P. 8527574. <https://doi.org/10.1155/2018/8527574>.
3. Nguyen V., Zhang J., Yang X. Low-frequency performance analysis of semi-active cab's hydraulic mounts of an off-road vibratory roller // Shock and Vibration. 2019. Vol. 2019. P. 8725382. <https://doi.org/10.1155/2019/8725382>.
4. Peiling Wang, Nguyen Van Liem, Jianrun Zhang. Experimental research and optimal control of vibration screed system (VSS) based on fuzzy control // Journal of Vibroengineering. 2020. Vol. 22. Iss. 6. P. 1415–1426. <https://doi.org/10.21595/jve.2020.21560>.
5. Siebelink S., Voordijk H., Endedijk M., Adrianse A. Understanding barriers to BIM implementation: Their impact across organizational levels in relation to BIM maturity // Frontiers of Engineering Management. 2020. Vol. 8. No. 9. P. 236–257. <http://doi.org/10.1007/s42524-019-0088-2>.
6. Vanliem Nguyen, Jianrun Zhang. A sensitivity analysis of the importance of the dynamic parameters on the paver's performance // Journal of Vibroengineering. 2020. Vol. 22. Iss. 2. P. 322–336. <http://doi.org/10.21595/jve.2020.20966>.
7. Guanghui Xu, George K. Chang. Continuous compaction control - mathematical models and parameter identification // Information Technology in Geo-Engineering: Proceedings of the 3rd International Conference (ICITG-2019). Guimarães, 2019. P. 563–584. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32029-4_49.
8. Qinglong Zhang, Tianyun Liu, Zhaosheng Zhang, Zehua Huangfu, Qingbin Li, Zaizhan An. Unmanned rolling compaction system for rockfill materials // Automation in Construction. 2019. Vol. 100. P. 103–117. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.004>.
9. Yipin Wan, Jie Jia. Nonlinear dynamics of asphalt-screed interaction during compaction: Application to improving paving density // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 202. P. 363–373. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.205>.
10. Wolf P., Vierling A., Husemann J., Berns K., Decker P. Extending skills of autonomous off-road robots on the example of behavior-based edge compaction in a road construction scenario // Commercial Vehicle Technology 2020/2021: Proceedings. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021. http://doi.org/10.1007/978-3-658-29717-6_5.
11. Александрова Е.Б. Минимизация рисков инвестиционно-строительных проектов с использованием BIM технологий // Инновации и инвестиции. 2018. № 11. P. 14–18. EDN: LDXNUO.
12. Асатрян В.А., Попова И.Н., Лазич Ю.В. Внедрение BIM-технологий как фактор конкурентоспособности компаний строительной отрасли // Beneficium. 2019. № 3 (32). С. 4–13. EDN: YCRYKT. [http://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2019.3\(32\).4-13](http://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2019.3(32).4-13).
13. Бадмаева И.А., Волкова Е.В. Технологии информационного моделирования объектов дорожного строительства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 4 (43). С. 521–528. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-4-521-528>. EDN: FXCTCH.
14. Гевара Рада Л. Т., Пешков В. В., Мартынов В. И., Радионова Е. А., Бужеева Ф. Г., Сайбаталова Е. В. Технологии информационного моделирования (BIM) как основа бережливого строительства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 1 (40). С. 70–81. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-1-70-81>. EDN: TDEUOH.

15. Колбасин А.М., Гумеров А.Р. Автоматизация дорожного строительства // Отходы и ресурсы. 2020. Т. 7. № 1. С. 12. EDN: JOUOZL. <http://doi.org/10.15862/12INOR120>.
16. Носов С.В. Анализ исследований взаимодействия грунтов земляного полотна и дорожных одежд с дорожными катками // Научный журнал строительства и архитектуры. 2018. № 3 (51). С. 72–82. EDN: XZDFOP.
17. Поршнева Л. «Строительный навигатор» задал курс на BIM, Цифровой кодекс и поиски человека труда // Отраслевой журнал «Строительство». 2021. № 4. С. 5–9.
18. Прокопьев А.П. Теоретические основы построения интеллектуальных систем управления уплотнением асфальтобетонных смесей // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 10–1. С. 48–58. EDN: PEHQSН. <https://doi.org/10.17513/snt.39345>.
19. Прокопьев А.П., Емельянов Р.Т., Иванчура В.И., Турышева Е.С. Автоматизация неразрушающего контроля уплотнения дорожных материалов. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2021. 156 с. EDN: FCRFCQ.
20. Прокопьев А.П., Набижанов Ж.И. Нейросетевая система управления процессом уплотнения дорожных материалов асфальтоукладчиками // Инженерный вестник Дона. 2021. № 10 (82). С. 120–129. EDN: XVGOZS.
21. Прокопьев А.П., Набижанов Ж.И., Емельянов Р.Т., Иванчура В.И. Новый метод нейросетевой системы контроля уплотнения асфальтобетонных смесей // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. 2021. № 9. С. 65–69. <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2021.09.21>. EDN: SLGGMC.
22. Рыбаков Д.А., Астафьева Н.С. Анализ эффективности строительно-инвестиционных проектов с учетом применения BIM-технологий // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 33. С. 1565–1570. EDN: STQVLP.
23. Соколов Н.С., Михайлова С.В. Организация технического надзора с помощью BIM-технологий при строительстве нефтеперерабатывающего завода // Научный журнал «Евразийский союз ученых». 2020. № 4-4 (73). С. 46–48. EDN: BSYMBK.
24. Бачурина С.С. Информационное моделирование: методология использования цифровых моделей в процессе перехода к цифровому проектированию и строительству. Ч. 1: Цифровой проектный менеджмент полного цикла в градостроительстве. Теория. М.: ДМК Пресс, 2021. 112 с.
25. Захаренко А.В., Пермяков В.Б., Молокова Л.В. Дорожные катки: теория, расчет, применение: монография. СПб.: Лань, 2018. 328 с.
26. Пермяков В.Б., Шапошников А.В. Исследование влияния температуры смеси и высоты образцов на прочность и плотность асфальтобетона // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: материалы II Национальной науч.-практ. конф. (г. Омск, 18–19 апреля 2019 г.). Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, 2019. С. 421–427. EDN: WHTIEN.
27. Самсонов В.В. Автоматизация конструкторских работ в среде Компас-3D. М.: Academia, 2019. 216 с.
28. Селевцов Л.И. Автоматизация технологических процессов. М.: Academia, 2019. 160 с.
29. Скрыпник Т.В., Василенко Т.Е. Инновационное развитие дорожной отрасли // Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. (г. Горловка, 22 мая 2019 г.). Горловка: Автомобильно-дорожный институт Донецкого национального технического университета, 2019. С. 204–206.
30. Шишмарев В.Ю. Автоматизация производственных процессов в машиностроении. Рн/Д: Феникс, 2018. 64 с.
31. Матвеева М.В., Адегбола А.А.А. К вопросу организации процессов 4D-моделирования и управления ими в строительстве // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 2. С. 190–195. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-2-190-195>. EDN: QVZRKL.
32. Пешков А.В., Матвеева М.В., Безруких О.А., Рогов Д.С. Обеспечение процессов контроля качества на всех этапах жизненного цикла объектов капитального строительства в рамках концепции «Строительство 4.0» // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 1. С. 90–97. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-1-90-97>. EDN: AИHCLW.

REFERENCES

1. Hu Z.Z., Leng S., Lin, J.R., Li S.-W., Xiao Y.-Q. Knowledge extraction and discovery based on BIM: a critical review and future directions. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2022;29:335-356. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09576-9>.

2. Nguyen V., Zhang J., Le V., Jiao R. Vibration analysis and modeling of an off-road vibratory roller equipped with three different cab's isolation mounts. *Shock and Vibration*. 2018;2018:8527574. <https://doi.org/10.1155/2018/8527574>.
3. Nguyen V., Zhang J., Yang X. Low-frequency performance analysis of semi-active cab's hydraulic mounts of an off-road vibratory roller. *Shock and Vibration*. 2019;2019:8725382. <https://doi.org/10.1155/2019/8725382>.
4. Peiling Wang, Nguyen Van Liem, Jianrun Zhang. Experimental research and optimal control of vibration screed system (VSS) based on fuzzy control. *Journal of Vibroengineering*. 2020;22(6):1415-1426. <https://doi.org/10.21595/jve.2020.21560>.
5. Siebelink S., Voordijk H., Endedijk M., Adriense A. Understanding barriers to BIM implementation: Their impact across organizational levels in relation to BIM maturity. *Frontiers of Engineering Management*. 2020;8(9):236-257. <http://doi.org/10.1007/s42524-019-0088-2>.
6. Vanliem Nguyen, Jianrun Zhang. A sensitivity analysis of the importance of the dynamic parameters on the paver's performance. *Journal of Vibroengineering*. 2020;22(2):322-336. <http://doi.org/10.21595/jve.2020.20966>.
7. Guanghui Xu, George K. Chang. Continuous compaction control - mathematical models and parameter identification. In: *Information Technology in Geo-Engineering: Proceedings of the 3rd International Conference (ICITG-2019)*. Guimarães; 2019. P. 563-584. http://doi.org/10.1007/978-3-030-32029-4_49.
8. Qinglong Zhang, Tianyun Liu, Zhaosheng Zhang, Zehua Huangfu, Qingbin Li, Zaizhan An. Unmanned rolling compaction system for rockfill materials. *Automation in Construction*. 2019;100:103-117. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.004>.
9. Yipin Wan, Jie Jia. Nonlinear dynamics of asphalt-screed interaction during compaction: Application to improving paving density. *Construction and Building Materials*. 2019;202:363-373 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.205>.
10. Wolf P., Vierling A., Husemann J., Berns K., Decker P. Extending skills of autonomous off-road robots on the example of behavior-based edge compaction in a road construction scenario. *Commercial Vehicle Technology 2020/2021: Proceedings*. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2021. http://doi.org/10.1007/978-3-658-29717-6_5.
11. Aleksandrova E.B. Minimizing the risks of investment and construction projects using BIM technologies. *Innovatsii i investitsii = Innovation and Investment*. 2018;11:14-18. (In Russ.). EDN: LDXNUO.
12. Asatrayn V.A., Popova I.N., Lazich YU.V. Implementation of BIM-technologies as a factor of competitiveness of companies in the construction industry. *Beneficium*. 2019;3:4-13. (In Russ.). [http://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2019.3\(32\).4-13](http://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2019.3(32).4-13). EDN: YCRYKT.
13. Badmaeva I.A., Volkova E.V. Information modelling of road facilities. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2022;12(4):521-528. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-4-521-528>. EDN: FXCTCH.
14. Guevara Rada L.T., Peshkov V.V., Mart'yanov V.I., Radionova E.A., Buzheeva F.G., Saibatalova E.V. Building Information Modelling (BIM) technology as a basis for lean construction. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2022;12(1):70-81. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-1-70-81>. EDN: TDEUOH.
15. Kolbasin A.M., Gumerov A.R. Automation of road construction. *Otkhody i resursy = Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2020;7(1):12. (In Russ.). EDN: JOUOZL. <http://doi.org/10.15862/12INOR120>.
16. Nosov S.V. Analysis of the research on the interaction of the base strength and road surfacing with road rotors. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury = Russian journal of building construction and architecture*. 2018;3:72-82. (In Russ.). EDN: XZDFOP.
17. Porshneva L. "Construction navigator" set the course for BIM, the Digital Code and the search for a man of labor. *Otraslevoi zhurnal «Stroitel'stvo»*. 2021;4:5-9. (In Russ.).
18. Prokopev A.P. Theoretical foundations of building intelligent control systems for compaction asphalt mixtures. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2022;10-1:48-58. (In Russ.).
19. Prokop'ev A.P., Emel'yanov R.T., Ivanchura V.I., Turyshcheva E.S. Automation of non-destructive testing of compaction of road materials. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2021. 156 p. (In Russ.). EDN: FCRFCQ.
20. Prokopev A.P., Nabizhanov Zh.I. Neural network control system for compaction of road materials of pavers. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering journal of Don*. 2021;10:10-20. (In Russ.). EDN: XVGOZS.
21. Prokopev A.P., Nabizhanov Zh.I., Emel'yanov R.T., Ivanchura V.I. A new method of neural network system for monitoring of asphalt mixtures compaction. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i Tekhnicheskie Nauki = Modern Science: actual problems of theory and practice*. 2021;9:65-69. (In Russ.).

- <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2021.09.21>.
EDN: SLGGMC.
22. Rybakov D.A., Astaf'eva N.S. Analysis of the effectiveness of construction and investment projects taking into account the use of BIM technologies. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*. 2021;33:1565-1570. (In Russ.).
23. Sokolov N.S., Mikhailova S.V. Organization of technical supervision using BIM technologies during the construction of an oil refinery. *Nauchnyy zhurnal "Evraziyskiy Soyuz Uchenykh" = Scientific journal "Eurasian Union of Scientists"*. 2020;4-4:46-48. (In Russ.). EDN: BSYMBK.
24. Bachurina S.S. Information modeling: methodology of using digital models in the process of transition to digital design and construction. Part 1: Digital project management of a full cycle in urban planning. Theory. Moscow: DMK Press; 2021. 112 p. (In Russ.).
25. Zakharenko A.V., Permyakov V.B., Molokova L.V. Road rollers: theory, calculation, application. Saint-Petersburg: Lan'; 2018. 328 p. (In Russ.).
26. Permyakov V.B., Shaposhnikov A.V. Study of the effect of the temperature of the mixture and height of samples on the strength and density of asphalt concrete. In: *Obrazovanie. Transport. Innovatsii. Stroitel'stvo: materialy II Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Education. Transport. Innovation. Construction: materials of the II National Science-practical conference*. 18-19 April 2019, Omsk, Omsk: Siberian State Automobile and Road University; 2019. p. 421-427. (In Russ.). EDN: WRITELN.
27. Samsonov V.V. Automation of design work in the Compass-3D environment. Moscow: Academia; 2019. 216 p. (In Russ.).

28. Selevtsov L.I. Automation of technological processes. Moscow: Academia; 2019. 160 p. (In Russ.).
29. Skrypnik T.V., Vasilenko T.E. Innovatsionnoe razvitiye dorozhnoi otrasli. *Nauchno-tekhnicheskie aspekty razvitiya avtotransportnogo kompleksa: materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Scientific and technical aspects of the development of the motor transport complex: materials of the V International Scientific and Practical Conference*. 22 May 2019, Gorlovka. Gorlovka: Automobile and Road Institute of Donetsk national technical university; 2019. p. 204-206. EDN: XJQIOS.
30. Shishmarev V.Yu. Automation of production processes in mechanical engineering. Rostov on Don: Feniks; 2018. 64 p.
31. Matveeva M.V., Adegbola A.A.A. Organization and management of 4D-modelling processes in construction. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2022;12(2):190-195. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-2-190-195>. EDN: QVZRKL
32. Peshkov A.V., Matveeva M.V., Bezrukh O.A., Rogov D.S. Ensuring quality control processes at all stages of the life cycle of capital construction projects under the Construction 4.0 concept. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2022;12(1):90-97. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-1-90-97>. EDN: AIHCLW.

Информация об авторах

Севастьянов Павел Дмитриевич,
производитель работ
дорожно-строительного управления,
ООО «Иркутская нефтяная компания»,
664007, г. Иркутск, Большой Литейный просп., 4,
Россия
e-mail: matrik40074@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-8211-941X>

Казаков Андрей Владимирович,
руководитель группы по 3D-моделированию
дорожно-строительного управления,
ООО «Иркутская нефтяная компания»,
664007, г. Иркутск, Большой Литейный просп., 4,
Россия
e-mail: Kazakov_av@Irkutskoil.ru
<https://orcid.org/0009-0004-4449-9680>

Information about the authors

Pavel D. Sevast'yav
Foreman of the Road
Construction Department,
LLC «Irkutsk Oil Company»,
4 Bolshoi Liteiny ave., Irkutsk 664007,
Russia,
e-mail: matrik40074@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-8211-941X>

Andrey V. Kazakov
Team Leader for 3D Modeling,
Road Construction Department,
LLC «Irkutsk Oil Company»,
4 Bolshoi Liteiny ave., Irkutsk 664007,
Russia,
e-mail: Kazakov_av@Irkutskoil.ru
<https://orcid.org/0009-0004-4449-9680>

Матвеева Мария Витальевна,

д.э.н., профессор,
профессор кафедры экспертизы
и управления недвижимостью,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: expertiza@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-9390-5444>

Mariya V. Matveeva

Dr. Sci. (Econ.), Professor,
Professor of the Department
of Expertise and Real Estate Management,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: expertiza@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-9390-5444>

Пешков Артем Витальевич,

к.э.н., доцент, доцент кафедры
строительного производства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: artempeshkov@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5027-5120>

Artem V. Peshkov

Cand. Sci. (Econ.), Assistant Professor,
Assistant Professor of the Department
of Construction Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: artempeshkov@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5027-5120>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 03.04.2023.
Одобрена после рецензирования 28.04.2023.
Принята к публикации 03.05.2023.

Information about the article

The article was submitted 03.04.2023.
Approved after reviewing 28.04.2023.
Accepted for publication 03.05.2023.

Научная статья

УДК 504.61; 624.058; 628.517

<https://elibrary.ru/earqbl>

<http://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-336-347>



Анализ и управление рисками в российских и международных стандартах безопасности

Е.Э. Смирнова

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье проводится анализ аспектов безопасности, изложенных в национальных стандартах. Рассматриваемая нормативная документация отвечает на вопрос, как достигнуть допустимого уровня риска. Приведены основные понятия оценки риска. Отмечаются позитивные изменения государственных стандартов в области безопасности. В законодательстве РФ по вопросам экологии нет единого кодекса: существуют федеральные законы, кодексы по отдельным сферам окружающей среды, а также подзаконные акты, правовые акты субъектов РФ. Среди основных законов, связанных с нормированием экологической безопасности в строительстве, следует назвать Федеральный закон № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды». Однако в нем регламентируется лидерство работодателя, а не его ответственность. В рамках совершенствования экологического аудита и менеджмента использование определенных штрафов и наказаний выглядит достаточно естественно. Главная же цель международного стандарта ISO 14001:2015 состоит не в том, чтобы указать на необходимость для руководителей обладать лидерскими качествами как основным фактором обеспечения экологической безопасности, а в том, чтобы сформировать ответственное отношение к экосистеме, природным ресурсам как важнейшему активу хозяйственной деятельности. Проблема в том, что аналитики риска не могут руководствоваться стандартами в полной мере из-за их несогласованности с универсальным международным стандартом ISO 31000:2018. Следует разработать подход к оценке рисков, описывающий взаимодействие различных сценариев, что обеспечит повышенный эколого-экономический эффект.

Ключевые слова: государственный стандарт, оценка риска, экологическая безопасность, ISO 31000:2018, ISO 14001:2015

Для цитирования: Смирнова Е.Э. Анализ и управление рисками в российских и международных стандартах безопасности // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 336–347. <https://elibrary.ru/earqbl>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-336-347>.

Original article

Risk analysis and management according to Russian and international safety standards

Elena E. Smirnova

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint Petersburg, Russia

Abstract. The paper analyzes the safety aspects outlined in national standards. The considered normative documentation answers the question of how to achieve acceptable risk levels. The basic concepts of risk assessment are presented. Positive changes in Russian safety standards are noted. There is no unified code in the legislation of the Russian Federation on environmental issues: there are federal laws, codes on certain environmental areas, as well as bylaws and legal acts of the subjects of the Russian Federation. Federal Law No. 7 “On Environmental Protection” should be mentioned among the main laws related to the regulation of environmental safety in construction. However, this law regulates

© Смирнова Е.Э., 2023

336

ISSN 2227-2917

(print)

ISSN 2500-154X

(online)

Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость
Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate

Том 13 № 2 2023

с. 336–347

Vol. 13 No. 2 2023

pp. 336–347

the employer's leadership rather than their responsibility. The use of certain fines and penalties seems quite reasonable within the framework of improving environmental audit and management. At the same time, the international standard ISO 14001:2015 is aimed at forming a responsible attitude toward the ecosystem and natural resources as the most important asset of economic activity, rather than at specifying the need for managers to demonstrate leadership qualities as the main factor of environmental safety. As a result, risk analysts cannot be fully guided by the standards because they are not aligned with the universal international standard ISO 31000:2018, which creates a significant problem. An approach to risk assessment that describes the interaction of different scenarios should be developed, which will provide an increased ecological and economic effect.

Keywords: state standard, risk analysis, environmental safety, ISO 31000:2018, ISO 14001:2015

For citation: Smirnova E.E. Risk analysis and management according to Russian and international safety standards. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(2):336-347. (In Russ.). <https://elibrary.ru/earqbl>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-336-347>.

ВВЕДЕНИЕ

Стандартизация процесса управления рисками играет важную роль в минимизации рисков для повышения эффективности экономической (хозяйственной) деятельности. Своевременная идентификация риска способствует защите стратегий менеджмента от критических значений риска как с позиций интересов предприятия, так и государства [1, 2].

Считается, что под понятием риска как отрицательного влияния неопределенности на цели имеется в виду риск как вероятность наступления некоего события, которое в случае наступления может принести организации ущерб [3–5].

В этой связи стремление обеспечить стандартную процедуру и стандартный критерий для определения и измерения качества анализа рисков, а также способствовать принятию решений по управлению рисками позволило определить необходимые процессы и процедуры (выявление контекста, участие заинтересованных сторон, идентификация и оценка рисков, принятие решений и управление рисками) для введения международных стандартов ISO 31000:2009¹ и ISO 14001:2015² в их русских версиях.

Ряд ученых отмечает преимущества этих

стандартов, которые были пересмотрены и опубликованы в новой редакции³ и снабжены руководством по применению⁴ [6]. В индустриально развитых странах весь жизненный цикл организации, любая деятельность по принятию решений на разных уровнях регулируются данными стандартами. Специалисты отмечают, что в России риск-ориентированный подход, как правило, не внедряется различными государственными структурами, а остается делом лишь частной инициативы.

Хотя есть примеры положительной практики в лице деятельности Росимущества, Министерства Экономического Развития и некоторых других государственных ведомств, требования, например, ГОСТ Р ИСО 31000-2018⁵ довольно часто противоречат международной нормативной базе в сфере менеджмента риска. Так, в последней версии ГОСТ Р ИСО 31000-2018 был исключен принцип неотделимости риск-менеджмента от процесса принятия решений, как и положение о неопределенности – исключительном предмете управления риском; было опущено определение остаточного риска, требующего соответствующих мероприятий для уменьшения его вероятности [7].

¹ISO 31000:2009 Управление риском: руководящие указания // ISO. Международная организация по стандартизации [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/43170.html> (25.10.2022).

²ISO 14001:2015 Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению // ISO. Международная организация по стандартизации [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iso.org/standard/60857.html> (25.10.2022).

³ISO 31000:2018 Управление риском: руководящие указания // ISO. Международная организация по стандартизации [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iso.org/standard/65694.html> (25.10.2022).

⁴ISO 14002:2019 Системы экологического менеджмента. Руководство по использованию ISO 14001 для рассмотрения экологических аспектов и условий в рамках экологической тематической области. Часть 1. Общие положения // ISO. Международная организация по стандартизации [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/70138.html> (11.10.2022).

⁵ГОСТ Р ИСО 31000-2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство» // Кодекс.ру [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200170125?ysclid=lf110sh06x354600363> (01.10.2022).

При сравнении основного природоохранного документа – Федерального закона «Об охране окружающей среды»⁶ и стандарта ISO 14001:2015, связанного с экологическими проблемами в компаниях с малыми и высокими рисками, становится очевидным, что обычные оперативные природоохранные мероприятия не могут привести к снижению производственных затрат и выходу компаний на международный уровень экономии средств и ресурсов [8]. Эффективностью обладают лишь промежуточные значения, добиваясь которых работодатели должны планировать и совершенствовать достигнутые показатели, чтобы улучшить состояния природно-технических систем. Стандарт подразумевает, что по своему определению экологический менеджмент может быть основан только на принципах безотходного производства (сокращения отходов и ничем не ограниченного потребления ресурсов), постоянной реализации более строгих экологических норм для уменьшения негативного воздействия компаний на окружающую среду. Он не имеет конечного результата, с точки зрения процесса обеспечения безопасности окружающей среды, т.е. ориентируясь на концепцию непрерывного улучшения, ISO 14001 сертифицирует наличие у организаций стратегического подхода (перспективно в плане обеспечения фирмам конкурентных преимуществ, сбалансированной стоимости активов и снижения страховых издержек гражданской ответственности) к разрешению экологических проблем. Таким образом разные по энергоэффективности и условиям экологической безопасности предприятия могут использовать ISO 14001 для улучшения состояния окружающей среды [9–11].

Актуальность темы исследования заключается в том, что стандарты ISO 31000:2018 и ISO 14001:2015 вместе с ISO Guide 73:2009⁷, содержащим ключевые термины рискологии, выгодно отличаются, например, от модели COSO «Управление рисками организации»⁸ [7]. Стандарт IEC 31010:2019 «Техника оценки риска»⁹ дополняет ISO 31000 подробной информацией относительно оценки рисков, а также описанием преимуществ и недостатков

различных методов при сравнении вариантов и возможностей управления рисками.

С учетом сказанного выше, автор поставил цель проанализировать российские национальные стандарты по аспектам безопасности на предмет их соответствия ISO 31000:2018 и ISO 14001:2015. Из цели вытекают следующие задачи:

- 1) выяснить конкретные преимущества ISO-стандартов;
- 2) определить, насколько они терминологически корректны;
- 3) каков диапазон применения по идентификации риска;
- 4) могут ли они использоваться для оценки любого типа рисков.

МЕТОДЫ

В своей методологии автор следовал понятию «риск», представленного в стандарте ISO 31000:2018 и ISO 14001:2015. Необходимо отметить, что под термином «безопасность» имеется в виду «отсутствие недопустимого риска». От того как определяют ключевое понятие «риск», зависит степень потенциального вреда здоровью людей, их имуществу или окружающей среде. Идентификация потенциального источника опасности также важна для последующей минимизации риска и оценки риска, оставшегося после принятых защитных мер, что очень важно для минимизации возможного эколого-экономического ущерба [12].

Методика исследования опирается также на понятие риска стандарта COSO ERM:2017 «Управление рисками организации». Данный документ не дает собственного определения «риска» и опирается на концепцию риска, разработанную *PricewaterhouseCoopers*. В ней «риск» понимается как негативный аспект неопределенного события (набора факторов), приход которого для фирмы может обернуться ущербом и/или выгодой. Последующая идентификация риска дает информацию о его порогах (организация пойдет на риск, если он ниже уровня воздействия; если выше, то он будет неприемлем).

Согласно ISO 31000:2018, риском является неопределенность, влияющая негативно и/или

⁶Об охране окружающей среде: федер. закон от 10 января 2002 г. N 7-ФЗ (в последней ред. от 26.03.2022 г.) // Garant.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/77322728> (07.06.2022).

⁷ISO Guide 73:2009 Управление рисками: словарь // ISO. Международная организация по стандартизации [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iso.org/standard/44651.html> (21.01.2023).

⁸COSO ERM:2017 Управление рисками организации. Интеграция со стратегией и эффективностью деятельности: краткое изложение // COSO. Комитет организаций-спонсоров Комиссии Трудя [Электронный ресурс]. URL: <https://www.coso.org/Shared%20Documents/2017-COSO-ERM-Integrating-with-Strategy-and-Performance-Executive-Summary.pdf> (07.03.2023).

⁹IEC 31010:2019 Управление рисками методы оценки рисков // ISO. Международная организация по стандартизации [Электронный ресурс]. (URL: <https://www.iso.org/standard/72140.html> (01.03.2023)).

позитивно на цели. ISO 31000:2018 определяет процессы риск-менеджмента как процедуры, практики и действия, направленные на осуществление коммуникации, консультирования, определение текущей ситуации во внешней и внутренней среде организации. Очевидно если не полное тождество формулировок *PricewaterhouseCoopers* и ISO 31000:2018, то их смысловая близость. При этом разработчики ISO 31000:2018 считают, что термином «риск» можно быть охарактеризован как источники угроз (hazards), потенциальные события (events), последствия (consequences), а также вероятности событий и/или последствий (likelihood). Анализ рисков включает подробное рассмотрение неопределенностей, источников риска, последствий, вероятности, событий, сценариев, средств контроля и их эффективности.

Методика исследования также строится на том, что понимание риска согласно с ISO 41001:2015 служит основой для обоснования принципов экологической безопасности хозяйственной деятельности и создания универсальной модели для (1) идентификации и (2) оценки рисков, (3) планирования и (4) реализации запланированных мер по предотвращению рисков. Предметный анализ предполагает следующий вопрос, как соотносятся понятия риска, неопределенности, управления риском, представленные в международных стандартах ISO 31000:2018 и ISO 41001:2015, с аспектами и требованиями безопасности, сформулированными в конкретных российских ГОСТах об управлении рисками.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Специфика нормативной базы по экологической безопасности в РФ. В законодательстве РФ по экологии нет единого кодекса. Оно представлено Федеральными законами, кодексами по отдельным сферам окружающей среды, а также подзаконными актами, правовыми актами субъектов РФ. Среди основных законов, связанных с нормированием экологической безопасности в строительстве, следует назвать Федеральный закон «Об охране окружающей среды» (в последней ред. от 26.03.2022 г.) от 10.01.2002 N 7-ФЗ с многочисленными поправками.

Проблема риск-менеджмента в отечественных стандартах: Прежний российский ГОСТ Р ИСО 31000-2009 и действующий ГОСТ Р ИСО 31000-2018, разработанные на основе ISO 31000, оцениваются как полезные документы. В них понятие риска определяется в соответствии с ISO 31000 и служит для прояснения менеджмента любых типов риска: как

влияния неопределенности на цели. Риск описывается формулой

Риск = Вероятность × Тяжесть события, (1)

где *Тяжесть события* – значительность последствий; стохастические условия реализации решения; подверженность возможности потерять неблагоприятные или благоприятные обстоятельства; шанс или ситуация ожидаемых потерь или достижения цели; интенсивность, размер и т.д. того, что ценят люди (жизни, окружающей среды, денег и т. д.). Потери и выгоды, например, выраженные в деньгах или числе погибших, являются способами определения серьезности последствий. При этом здесь речь идет о рисках как воздействии неопределенности (условий недостатка информации) на поставленные цели. Следует отметить, что приведенная формула не является полной. Вероятность не охватывает все аспекты проблемы экологического менеджмента. Чтобы объяснить это, нам нужно сначала ввести два общих способа интерпретации вероятности: классическую интерпретацию относительной частоты и субъективную байесовскую интерпретацию.

Согласно классической парадигме относительной частоты вероятность интерпретируется как нечто повторяющееся бесконечное число раз. Событие происходит, если анализируемая ситуация гипотетически «повторялась». Следовательно, оценки риска могут быть более или менее точными по сравнению с лежащим в основе истинным риском. В этом случае неопределенности в оценках могут быть очень большими и их трудно выразить.

С точки зрения байесовской перспективы, вероятность представляется как мера неопределенности событий и последствий, рассматриваемая аналитиком риска и основанная на доступной исходной информации. В этом случае вероятность – это субъективная мера неопределенности, зависящая от доступного ее знания. Эталонном является некий стандарт, назначенный оценщиком риска, но при этом нет ссылки на правильную или истинную вероятность. Назначенные вероятности зависят от конкретных базовых знаний и могут давать неверные прогнозы.

Рассмотрим риск экологических последствий, связанных с работой морской нефтяной установки, где руководитель отдела обеспокоен износом некоторого критического оборудования. Регламент технического обслуживания гарантирует, что износ не вызовет проблем с безопасностью. Скажем, речь идет о специальной программе обслуживания для предотвращения подобного рода проблем.

Итак, каков же риск от утечки нефти, который в нашем случае вызван инцидентом, связанным с эксплуатацией оборудования. На основании справочной информации (исторических данных) о надлежащем техническом регламенте вероятность утечки, например, составляет 2%. Понятно, что этот показатель никоим образом не отражает обеспокоенность руководства работой установки.

Расчеты нацелены на то, чтобы программа технического обслуживания была эффективной, но они упускают из виду следующее. Со временем добыча нефти может потребовать изменения условий эксплуатации. Проблемы с содержанием H_2S и CO_2 , образованием накипи, увеличением бактерий, эмульсиями и прочими факторами риска должны быть разрешены (к примеру, путем добавления соответствующих химикатов и добавок).

Все эти факторы вызывают повышенную вероятность коррозии и других негативных условий, которые могут вызвать утечки. Однако за заданием соблюдать критерий в 2% скрывается важный элемент неопределенности. При анализе риска выполняется целый ряд подобных назначений вероятностей. Тем самым скрытые неопределенности могут где-то привести к неожиданным последствиям. Неизвестно, где произойдет неприемлемая тяжесть событий, но, безусловно, такие события могут случиться.

В нашем случае указанные стандарты обеспечивают управление рисковыми событиями и дают возможность значительно повысить шансы организациям на успешное завершение проектов и экономический эффект. В них также указывается, что ГОСТ Р ИСО 31000-2018 может применяться к любой деятельности, включая процесс принятия решений на всех уровнях управления. С другой стороны, документ носит рекомендательный характер, совершенно не обязателен для исполнения. Все это не позволяет принять обоснованные решения по функционированию экологически безопасных природно-техногенных комплексов.

Рассмотрим отечественный ГОСТ Р 51898-2002 «Аспекты безопасности. Правила включения в стандарты»¹⁰, в котором даются руководящие принципы включения аспектов безопасности в разнообразные кодексы, стандарты и руководства (например, в ГОСТ Р 22.0.01-2016 «Безопасность в чрезвычайных

ситуациях»¹¹ и т.д.).

В указанном документе используются термины «безопасность», «риск», «опасность», «событие, вызывающее ущерб». Рациональное принятие решений требует четкого и количественного способа выражения риска, чтобы его можно было должным образом проанализировать вместе со всеми другими затратами и выгодами в процессе принятия решений.

Это говорит о том, что риск как фоновое значение всегда присутствует в хозяйственной деятельности, и, следовательно, остается только выбирать между рисками [13–15].

Под «риском» понимается сочетание вероятности нанесения ущерба и степени его тяжести (т.е. физического повреждения или другого вреда окружающей среде или здоровью людей). Соответственно, под безопасностью имеется в виду любой приемлемый риск возникновения события, приводящего к ущербу.

На рис. 1 представлен процесс минимизации риска, согласно ГОСТ Р 51898-2002.

Обращает на себя внимание основной недостаток данного государственного стандарта. В блок-схеме понятие «неопределенность» вообще не упомянуто, хотя само по себе понятие «риск» включает в себя представление как неопределенности, так и возможных убытков или ущерба. Из этого анализа, казалось бы, вытекает следующая формула определения риска:

$$R = U + C, \quad (2)$$

где U означает неопределенность, C – ущерб.

Однако в стандарте, как уже было указано, о неопределенности ничего не говорится. Согласно данному государственному стандарту, формула риска имеет вид

$$R = P \times C, \quad (3)$$

где P – вероятность, C – ущерб.

Действительно, в ряде ведомственных стандартах риск предлагается рассчитывать как произведение вероятности аварии на объекте и потерь, понесенных окружающей природной средой непосредственно вследствие техногенного происшествия; ущерб же трактуется как денежная форма причинения негативного техногенного воздействия и его последствий на конкретную экосистему (например, «Временное методическое руководство по оценке экологического риска деятельности

¹⁰ГОСТ Р 51898-2002 Аспекты безопасности. Правила включения в стандарты от 05.06.2002 г. (ред. от 01.08.2018) // [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200030314> (01.03.2023).

¹¹ГОСТ Р 22.0.01-2016 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Основные положения от 01.06.2017 г. // [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200136692?ysclid=i9vovx664g999742542> (07.03.2023).

нефтебаз и автозаправочных станций»¹², «Временные рекомендации по оценке экологической опасности производственных объек-

тов»¹³, «Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба»¹⁴ и т.д.

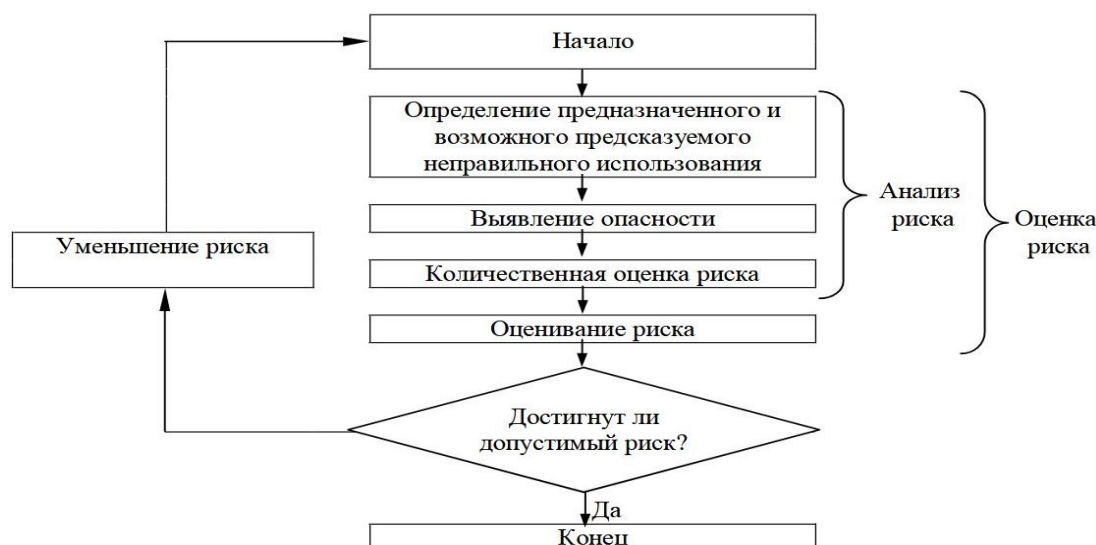


Рис. 1. Процесс минимизации риска, согласно ГОСТ Р 51898-2002

Fig. 1. Risk minimization process, according to GOST R 51898-2002

Следует еще раз отметить, что риск указывает на событие, которое может случиться или не случиться. Но если оно наступает, возможны три исхода: негативный (потери, ущерб, проигрыш), нулевой (нет ни потерь, ни выгод), позитивный (выгоды, прибыль, выигрыш).

Ясно, что если непрестанно избегать риска, то невозможно принять решение об обеспечении безопасности окружающей среды от техногенного воздействия. Так называемая, «безрисковая» зона, предшествующая «дереву событий» есть, собственно говоря, лишь некоторое допущение, инициирующее дальнейший процесс выигрыша или проигрыша. Как уже говорилось, фоновое значение риска присуще всей природно-технической системе, поскольку «безрисковое» состояние также определено относительно риска, т.е. опасность и ущерб заложены в любое отношение к природной среде, потенциально присутствуют в неопределенной степени. Поэтому ряд авторов количественную характеристику риска

сопоставляет с неопределенностью [16, 17].

Неопределенность отсылает ко многим возможным исходам, ничего не говоря об их вероятности. Риск же – к ситуации с конечным числом исходов, значения частоты вероятности которых известны. Риски можно страховать. Неопределенность же не страхуема. Тем не менее, быстрый техногенный прогресс связан именно с неопределенностью. Скажем, согласно закону больших чисел, случайная величина получает значения среднего математического ожидания и служит для оценки вероятности больших отклонений, т.е. при большом числе случайных величин достоверно известно, что их среднее арифметическое как случайная величина бесконечно мало отличается от неслучайной нормальной величины значения ее среднего математического ожидания. Другими словами, действие совокупности случайных факторов дает результат, который почти не зависит от случая. Здесь имеет место известное приближение расчетов вероятных величин к константе [18, 19].

¹²«Временное методическое руководство по оценке экологического риска деятельности нефтебаз и автозаправочных станций» от 21.12.1999 г. // [Электронный ресурс]. URL: http://snipov.net/c_4654_snip_59538.htm (07.03.2023).

¹³«Временные рекомендации по оценке экологической опасности производственных объектов» от 15.03.2000 г. // [Электронный ресурс]. URL: <https://mognovse.ru/uow-vremennye-rekomendacii-po-ocenke-ekologicheskoy-opasnosti.html> (07.03.2023).

¹⁴«Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба» от 09.03.1999 г. [Электронный ресурс]. URL: https://e-ecolog.ru/docs/aqKhftDjtua_tjsE22Mq9?ysclid=If1q165x51996814360 (07.03.2023).

¹⁵ГОСТ Р 14.09-2005 Экологический менеджмент. Руководство по оценке риска в области экологического менеджмента // [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200077552> (21.01.2022).

Но возникает проблема: если в рисковом решении не будет фактора случайности, случайных параметров, случайной цепи событий, то как быть с альтернативностью и стохастичностью?

Если критерии рискованного решения будут основаны на достижении поставленной задачи, не будут противоречить нормативным актам, следовать современным научно-техническим требованиям, направлены на борьбу с риском потерь и рисковыми последствиями, то такого рода стремление не проиграть превратит риск в спускаемые сверху директивы. Произойдет фактическая девальвация риска.

В последнем случае не может быть и речи о результативности и конкурентоспособности в хозяйственной деятельности. Напротив, в ситуации риска на первый план выходит корреляция вероятных потерь и значимости конечного результата и выигрыша.

Анализируя многочисленные определения риска, следующие ключевые определения можно назвать основными чертами ситуации риска. В ней:

1) должны быть альтернативные решения, так как у нас нет точного знания последствий антропогенного вмешательства в природу и нет точного соответствия между задуманным и осуществляемым из-за подверженности ошибкам (здесь необходимо отметить, что риск-менеджер имеет дело с выбором: а) более надежный и приемлемый, но меньший успех или б) ожидаемый с меньшей уверенностью и сомнением, но больший выигрыш; очевидно, что больший успех как некая провокация достичь невозможной цели говорит о нежелании вообще устранить неопределенность из практики);

2) при расчете риска на основе обработки данных проявляется заинтересованность в будущей большой выгоде, успех которой маловероятен и крайне неопределен, и, напротив, в случае малого, но гарантированного успеха побуждения принимать рискованные решения у индивида не возникает.

3) реализуется стохастический характер события или действия, определяющий один из возможных исходов осуществления решения;

4) после принятия решения развитие рискованной ситуации должно привести к возникновению потерь или получению дополнительных преимуществ и выгод.

Риск не может быть понят вне двумерной комбинации (1) событий и (2) последствий этих событий, а также связанных с ними (3) неопределенностей, что согласуется со смыслом стандарта ISO 31000:2018. Но указанный

аспект оценки риска отсутствует в стандарте ГОСТ Р 51898-2002.

Концепция приемлемого риска. Одна из сложнейших областей риск-менеджмента – концепция приемлемого риска, с одной стороны, не имеет детального описания в ISO 31000:2018, с другой стороны, в российском ГОСТ Р 51898-2002 она получила контекстуальное разъяснение: какой риск считать приемлемым следует определять после сравнительной оценки рисков. Это можно объяснить тем, что данный государственный стандарт не столько требует от специалиста в области риск-менеджмента рассматривать управление риском в рамках общей системы управления и стратегического планирования, сколько правильно идентифицировать и предлагать меры реагирования на отдельные риски. В ситуации принятия важных управленческих решений решающее значение приобретает человеческий фактор. Персональные предпочтения риск-менеджеров (одни склонны к риску, другие – нет) должны нивелироваться посредством внедрения современных инструментов имитационного моделирования на основе облачных цифровых платформ. Качественные и количественные методы в сфере риск-ориентированного планирования ориентируются не на фиксированные основные параметры, а на их распределение и перечни наиболее критичных рисков, что сказывается на выборе методов по их управлению, а также оценке принятых ключевых решений.

Напротив, единый регламент управления рисками, единая шкала оценки (единая методология) процессов по рискам должны быть заменены множеством подходов к принятию решений и реализации деятельности организации, т.е. разными критериями оценки, методологиями, инструментами анализа, классификаторами рисков. Они должны использоваться в рамках принятия различных решений или осуществления деятельности организации. После выявления и оценки ключевых рискованных ситуаций на основе модели распределения доходов и расходов компании могут разрабатываться мероприятия по их нивелированию для включения их в блок-схему алгоритма действий на будущий период. В случае если уровень исходных рисков неприемлем, их анализ потребует пересмотра стратегии и целевых показателей компании.

Следующие недостатки присущи стандарту ГОСТ Р 51898-2002. Формула «риск – это сочетание вероятности и последствий» вводит в заблуждение относительно оценки риска в случае единственного сценария развития событий. В рамках вероятностно-

математической модели значимость риска, а, следовательно, ущерба, можно определить на основе теории вероятности (с характеристиками случайного ущерба: математическим ожиданием в качестве среднего ущерба и дисперсии в качестве показателя разброса значений). К тому же анализ рисков систематизирует имеющиеся знания и неопределенности (!) относительно явлений, систем и видов деятельности, которые изучаются.

Иначе говоря, поскольку решения принимаются в рамках недостаточной информации, на основе случайных параметров и процесса развития ситуации, неизбежности альтернативности варианта действий, важно добиться идентификации вероятности наступления события, интенсивности его воздействия на эко-

систему, возможности выявления/контроля. Очевидно, что вероятностно-математическая модель определяется алгоритмом, с помощью которого она была создана. Математическое моделирование помогает соблюсти соответствие заданным требованиям, избежать непредвиденных ошибок и оптимизировать производительность системы. Если говорить об оценке экологического риска, разработанной в ГОСТ Р 14.09-2005 «Экологический менеджмент...»¹⁵, то она требует развития сценарного подхода [20].

Риск определяется здесь ссылкой на ГОСТ Р 51898-2002, т.е. как «вероятность, умноженная на последствия». Итеративный процесс минимизации риска (рис. 2) идентичен, приведенному на рис. 1.

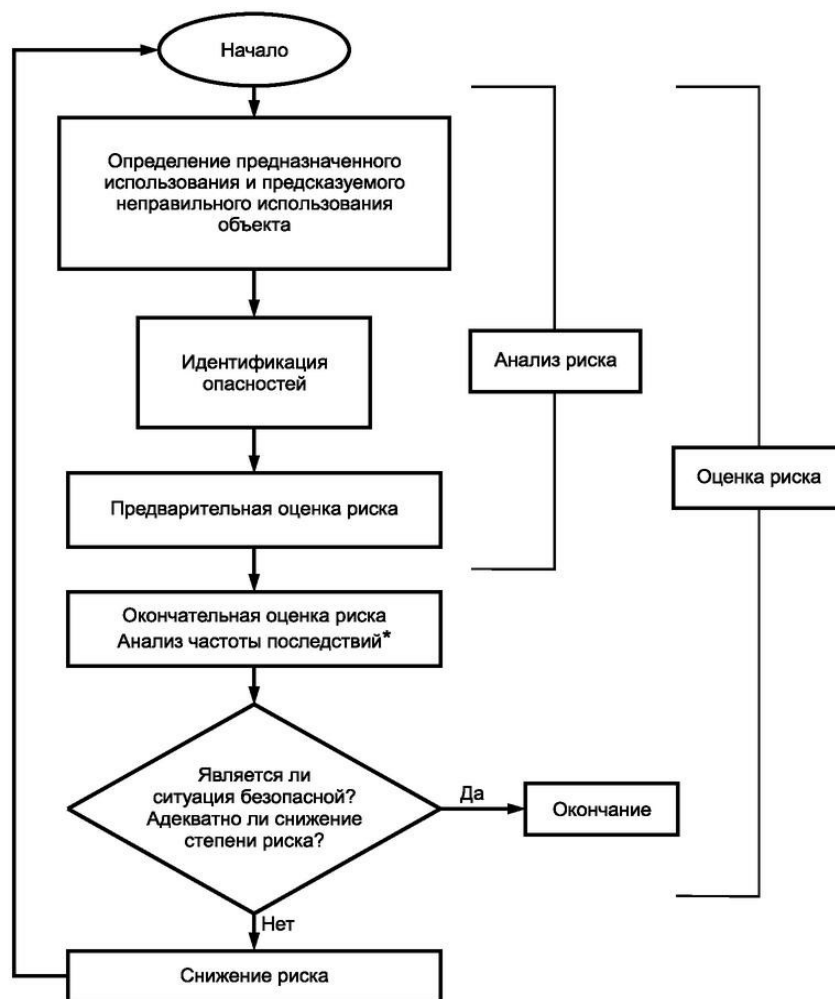


Рис. 2. Итеративный процесс минимизации экологического риска, согласно ГОСТ Р 14.09:2005
Fig. 2. Iterative process of minimizing environmental risk, according to GOST R 14.09:2005

Хотя акцент в стандарте сделан на интерактивность процесса минимизации риска,

чтобы подчеркнуть направленность на эффективность управления рисками (выделение

¹⁵ГОСТ Р 14.09-2005 Экологический менеджмент. Руководство по оценке риска в области экологического менеджмента» // [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200077552> (21.01.2022).

необходимых ресурсов, назначение ответственных лиц, наделение их необходимыми полномочиями), тем не менее, ограниченная методика понимания рисков терминологии не позволит предприятиям (в частности, в жилищном фонде) полностью реализовать коммуникативную суть данного стандарта.

Причина недоработки заключается в том, что неопределенность относится как к событию, так и к последствиям его возникновения (что зафиксировано в ISO 31000:2018, но не упомянуто в ГОСТ Р 14.09-2005).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом можно сделать вывод, что исследование подтвердило исходную гипотезу о преимуществе международного стандарта ISO 31000:2018 и недостаточной проработанности ряда российских национальных стандартов по безопасности (ГОСТ Р 51898-2002 и ГОСТ Р 14.09-2005). Проведенный анализ позволяет выявить основные их недостатки:

1) главная цель риск-менеджмента, провозглашенная в ISO 31000:2018, т.е. создание, развитие и защита ценностей организации (фирмы), не может быть полностью реализована в российских государственных стандартах;

2) действующий ГОСТ Р 51898-2002 не дает конкретных ответов, как обеспечить надлежащую и адекватную количественную оценку рисков и выявить их допустимый уровень и возможный ущерб;

3) концепция безопасности, прописанная в стандарте ГОСТ Р 14.09-2005, слишком абстрактна и неадекватна для оценки экологического риска (во многих случаях риски непоставимы линейно, поэтому какой риск считать допустимым, остается неясным);

4) нельзя говорить о риске как о приемлемом вне сочетания с затратами и выгодами, которые сопутствуют этому риску. Процедура измерения неопределенности, или вычисление приемлемого риска, предполагает сценарный подход, о котором в рассматриваемых госстандартах ничего не говорится;

5) стандарт ISO 14001:2015, является документом устойчивой направленности с целью поддержать долгосрочную жизнеспособность бизнеса. Он не имеет конечного результата, с точки зрения процесса обеспечения безопасности окружающей среды, т.е. ориентируясь на концепцию непрерывного улучшения. Обычные оперативные природоохранные мероприятия, прописанные в российских стандартах, не могут привести к снижению производственных затрат и выходу компаний на международный уровень экономии средств и ресурсов;

6) согласно ISO 14001, эффективностью обладают лишь промежуточные значения, добиваясь которых, работодатели должны планировать и совершенствовать достигнутые показатели, чтобы улучшить состояние природно-технических систем.

Российские стандарты через систему предельных показателей не могут регулировать разные по энергоэффективности и условиям экологической безопасности предприятия для достижения устойчивого состояния окружающей среды.

Преимущества международных стандартов ISO 31000:2018 и ISO 14001:2015 заключаются:

1) в разработке единой стратегии ресурсосберегающего производства и принципов принятия эффективных и экологически безопасных решений;

2) они максимально терминологически корректны и представлены в действующих российских стандартах (напр., ГОСТ Р ИСО 31000-2018, ГОСТ Р ИСО 14001-2015);

3) данные стандарты имеют универсальный диапазон применения по идентификации рисков;

4) они применимы для оценки любого типа рисков как с положительными, так и отрицательными последствиями. Все это обеспечивает максимальный эколого-экономический эффект.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Crispin G. The essence of risk identification in project risk management: An overview // International Journal of Science and Research. 2020. Vol. 9. Iss. 2. P. 1553–1557. <https://doi.org/10.21275/SR20215023033>.
2. Gallop D., Willy C., Bischoff J. How to catch a black swan: Measuring the benefits of the premortem technique for risk identification // Journal of Enterprise Transformation. 2016. Vol. 6. Iss. 2. P. 87–106. <https://doi.org/10.1080/19488289.2016.1240118>.
3. Rausand M., Haugen S. Risk assessment: The-

ory, methods, and applications. London: Wiley, 2020. 784 p.

4. Matuszak-Flejszman A., Paliwoda B. Influence of the Implemented Management Systems on Risk-Based Thinking in Organizations – A Review. In: Proceedings of the 36th International Business Information Management Association (IBIMA). Cordoba: IBIMA, 2022. P. 6644–6651.

5. de Melo F.J. C, de Medeiros D.D. Applying interpretive structural modeling to analyze the fundamental concepts of the management excellence

model guided by the risk-based thinking of ISO 9001:2015 // *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2020. Vol. 27. P. 742–772. <https://doi.org/10.1080/10807039.2020.1752144>.

6. Link S., Naveh E. Standardization and discretion does the environmental standard ISO 14001 lead to performance benefits? // *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2016. Vol. 53. Iss. 4. P. 508–519. <https://doi.org/10.1109/TEM.2006.883704>.

7. Кушнин Б.А., Фурта С.Д., Лякин А.Ю., Голембиовская Д.С., Журавлев М.А. Сравнение версий национального стандарта Российской Федерации «Менеджмент риска. Принципы и руководство» (ГОСТ Р ИСО 31000-2019 и ГОСТ Р ИСО 31000-2010) с учетом первоисточников // *Стратегические решения и риск-менеджмент*. 2022. Т. 13. № 2. С. 134–150. EDN: IDRNNK. <https://doi.org/10.17747/2618-947X-2022-2-134-150>.

8. Смирнова О.П., Вавилова М.А. Особенности внедрения системы экологического менеджмента в промышленности // *Естественно-гуманитарные исследования*. 2022. Т. 39. № 1. С. 303–308. EDN: FQREAV. <https://doi.org/10.24412/2309-4788-2022-1-39-303-308>.

9. Шпаков А.С., Бурдонов А.Е. Основные проблемы на пути внедрения экологического менеджмента в Российской Федерации // *Экономика и экологический менеджмент*. 2019. № 1. С. 154–162.

10. Гаджиев Н.Г., Коноваленко С.А., Трофимов М.Н., Гаджиев А.Н. Роль и значение экологической безопасности в системе обеспечения экономической безопасности государства // *Юг России: экология, развитие*. 2021. Т. 16. № 3. С. 200–214. EDN: URGMOB. <https://doi.org/18470/1992-1098-2021-3-200-214>.

11. Новикова Е. В. Эколого-правовое регулирование на этапе развития зеленой экономики в России // *Экологическое право*. 2020. № 4. С. 9–16. EDN: FUBAMJ. <https://doi.org/10.18572/1812-3775-2020-4-9-16>.

12. Smirnova E. Environmental risk analysis in construction under uncertainty. In: *Reconstruction and restoration of architectural heritage*. In: S. Semensov, A. Leontyev, S. Huerta, I. Menéndez Pidal de

Nava (eds.). London: CRC Press, 2020. P. 222–227. <https://doi.org/10.1201/9781003129097-47>.

13. Larionov A., Nezhnikova E., Smirnova E. Risk assessment models to improve environmental safety in the field of the economy and organization of construction: A case study of Russia // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. No. 24. P. 13539. <https://doi.org/10.3390/su132413539>.

14. Andersen T.J., Young P.C. Strategic risk leadership: Engaging a world of risk, uncertainty, and the unknown. Abingdon: Routledge, 2020. 164 p.

15. Jones A. Risk, opportunity, uncertainty and other random models. Abingdon, Oxon: Routledge, 2019. 316 p.

16. Smirnova E., Mamedov S., Shkarovskiy A. Improving the environmental safety risk assessment in construction using statistical analysis methods // *Rocznik Ochrona Srodowiska*. 2022. Vol. 24. p. 110–128. <https://doi.org/10.54740/ros.2022.009>.

17. Furr N., Furr S.H. The upside of uncertainty: A guide to finding possibility in the unknown. La Vergne: Harvard Business Review Press, 2022. 321 p.

18. Пашкевич М.А., Быкова М.В. Исследование возможности повышения точности измерений при установлении уровня загрязнения почв нефтепродуктами // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2022. № 4. С. 67–86. EDN: WXCTEN. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_4_0_67.

19. Хохряков А. В., Рыбников П. А., Цейтлин Е. М., Коновалов И. В. Использование интегрального показателя экологического риска для обоснования природоохранных решений в условиях неопределенности на примере накопителей жидких промышленных отходов // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021. Т. 11. № 1. С. 71–89. EDN: PLGTNY. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_11_0_71.

20. Smirnova E. Monte Carlo simulation of environmental risks of technogenic impact. In: E. Rybnov, P. Akimov, M. Khalvashi, E. Vardanyan (eds.). *Contemporary problems of architecture and construction*. London: CRC Press, 2021. P. 355–360. <https://doi.org/10.1201/9781003176428-69>.

REFERENCES

1. Crispin G. The essence of risk identification in project risk management: An overview. *International Journal of Science and Research*. 2020;9(2):1553-1557. <https://doi.org/10.21275/SR20215023033>.

2. Gallop D., Willy C., Bischoff J. How to catch a black swan: Measuring the benefits of the pre-mortem technique for risk identification. *Journal of Enterprise Transformation*. 2016;6(2):87-106. <https://doi.org/10.1080/19488289.2016.1240118>.

3. Rausand M., Haugen S. Risk assessment: Theory, methods, and applications. London: Wiley;

2020. 784 p.

4. Matuszak-Flejszman A., Paliwoda B. Influence of the Implemented Management Systems on Risk-Based Thinking in Organizations – A Review. In: *Proceedings of the 36th International Business Information Management Association (IBIMA)*. Cordoba: IBIMA; 2022. p. 6644-6651.

5. de Melo F.J. C, de Medeiros D.D. Applying interpretive structural modeling to analyze the fundamental concepts of the management excellence model guided by the risk-based thinking of ISO 9001:2015. *Human and Ecological Risk Assess-*

ment: *An International Journal*. 2020;27:742-772. <https://doi.org/10.1080/10807039.2020.1752144>.

6. Link S., Naveh E. Standardization and discretion does the environmental standard ISO 14001 lead to performance benefits? *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2016;53(4):508-519. <https://doi.org/10.1109/TEM.2006.883704>.

7. Kushnin B.A., Furta S.D., Lyakin A.Y., Golembi-ovskaya D.S., Zhuravlev M.A. Comparison of russian national standard "Risk management. Principles and guidelines" Releases (GOST R ISO 31000:2019 and GOST R ISO 31000:2010), taking into account primary sources. *Strategicheskie resheniya i risk-menedzhment = Strategic Decisions and Risk Management*. 2022;13(2):134-150. (In Russ.). EDN: IDRNNK. <https://doi.org/10.17747/2618-947X-2022-2-134-150>.

8. Smirnova O.P., Vavilova M.A.2. Features of the implementation of the environmental management system in industry. *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya*. 2022;39:303-308. (In Russ.). EDN: FQREAV. <https://doi.org/10.24412/2309-4788-2022-1-39-303-308>.

9. Burdonov A.E., Shpakov A.S. The main problems on the way of introduction of environmental management in the Russian Federation. *Ekonomika i ekologicheskii menedzhment = Economics and Environmental Management*. 2019;1:154-162. (In Russ.). <https://doi.org/10.17586/2310-1172-2019-12-1-154-162>.

10. Gadzhiev N.G., Konovalenko S.A., Trofimov M.N., Gadzhiev A.N. The role and significance of environmental safety in the system of ensuring the state's economic security. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie = South of Russia: ecology, development*. 2021;16(3):200-214. (In Russ.). EDN: URGMOB. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2021-3-200-214>.

11. Novikova E.V. The Environmental and legal regulation on the green economy development stage in Russia. *Ekologicheskoe pravo*. 2020;4:9-16. (In Russ.). EDN: FUBAMJ. <https://doi.org/10.18572/1812-3775-2020-4-9-16>.

12. Smirnova E. Environmental risk analysis in construction under uncertainty. In: Reconstruction and restoration of architectural heritage. S. Sementsov, A. Leontyev, S. Huerta, I. Menéndez Pidal de Nava (eds.). London: CRC Press;

2020. p. 222–227. <https://doi.org/10.1201/9781003129097-47>.

13. Larionov A., Nezdnikova E., Smirnova E. Risk assessment models to improve environmental safety in the field of the economy and organization of construction: A case study of Russia. *Sustainability*. 2021;13(24):13539. <https://doi.org/10.3390/su132413539>.

14. Andersen T.J., Young P.C. Strategic risk leadership: Engaging a world of risk, uncertainty, and the unknown. Abingdon: Routledge; 2020. 164 p.

15. Jones A. Risk, opportunity, uncertainty and other random models. Abingdon, Oxon: Routledge; 2019. 316 p.

16. Smirnova E., Mamedov S., Shkarovskiy A. Improving the environmental safety risk assessment in construction using statistical analysis methods. *Rocznik Ochrona Srodowiska*. 2022;24:110-128. <https://doi.org/10.54740/ros.2022.009>.

17. Furr N., Furr S.H. The upside of uncertainty: A guide to finding possibility in the unknown. La Vergne: Harvard Business Review Press; 2022. 321 p.

18. Pashkevich M.A., Bykova M.V. Improvability of measurement accuracy in determining the level of soil contamination with petroleum products. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2022;4:67-86. (In Russ.). EDN: WXCTEH. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_4_0_67.

19. Khokhryakov I.V., Rybnikov P.A., Tseytlin E.M., Konovalov I.V. Integrated environmental risk index in justification of nature-oriented decision-making under uncertainty: a case-study of liquid industrial storage. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2021;11-1:71-89. (In Russ.). EDN: PLGTNY. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_11_0_71.

20. Smirnova E. Monte Carlo simulation of environmental risks of technogenic impact. In: E. Rybnov, P. Akimov, M. Khalvashi, E. Vardanyan (eds.). Contemporary problems of architecture and construction. London: CRC Press, 2021. P. 355–360. <https://doi.org/10.1201/9781003176428-69>.

Информация об авторе

Смирнова Елена Эдуардовна,

к.т.н., доцент, доцент
кафедры техносферной безопасности,
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный
университет,
190005, г. Санкт-Петербург,
2-я Красноармейская ул., 4, Россия,
e-mail: esmirnovae@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9860-9230>

Information about the author

Elena E. Smirnova,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Technosphere Security,
Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering,
4 Vt. Krasnoarmejskaja St., Saint Petersburg
190005, Russia,
e-mail: esmirnovae@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9860-9230>

Вклад автора

Автор провел исследование, подготовил рукопись к печати и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.02.2023.
Одобрена после рецензирования 17.03.2023.
Принята к публикации 21.03.2023.

Contribution of the author

Author has conducted the study, prepared the manuscript for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Information about the article

The article was submitted 20.02.2023.
Approved after reviewing 17.03.2023.
Accepted for publication 21.03.2023.

**Метод гармонического элемента в расчетном обеспечении безопасности эксплуатации сооружений****В.И. Соболев¹, Д.А. Кармазинов², Т.Н. Черниговская³**^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия³Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Рассмотрены возможности и результативность применения метода гармонического элемента в определении и формировании частотных характеристик сооружений, подверженных интенсивным динамическим воздействиям. Возможности формирования необходимых величин частот собственных колебаний сооружений реализуются за счет включения в параметры гармонических элементов продольных сил, влияющих на процессы изгибных колебаний балочных элементов. Таким образом, осуществляется возможность настройки частот собственных колебаний, варьирование которыми позволяет в известных пределах осуществлять функции виброзащиты или сейсмозащиты сооружения, а также давать оценку границ устойчивости сооружения. Возможность учета в качестве гармонических элементов балок с распределенными инерционными массами, сосредоточенных масс, твердых тел позволяет создавать динамические модели сооружений, несущих технологическое оборудование, избегая построения дискретизированных моделей, порождающих проблемы оценки погрешности дискретизации и многочисленные проблемы вычислительного характера. Для железобетонных конструкций формирование необходимых продольных сил возможно при помощи преднапряжений арматуры.

Ключевые слова: собственные колебания, продольные силы, преднапряжения, гармонические элементы, безопасность сооружений

Для цитирования: Соболев В.И., Кармазинов Д.А., Черниговская Т.Н. Метод гармонического элемента в расчетном обеспечении безопасности эксплуатации сооружений // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 348–358. <https://elibrary.ru/qzaena>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-348-358>.

Original article**Harmonic element method for calculation of operating safety of structures****Vladimir I. Sobolev¹, Danil A. Karmazinov², Tatyana N. Chernigovskaya³**^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia³Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Abstract. The possibilities and efficiency of the use of the harmonic element method (HEM) for the determination of frequency characteristics for structures subjected to intensive dynamic effects are considered. This method allows the necessary values of frequencies for structural natural vibrations to be obtained by including the longitudinal forces influencing the bending vibrations of beam elements in the parameters of harmonic elements. Therefore, it is possible to adjust the frequencies of natural vibrations, whose variation within known limits offers the vibration or seismic protection of the structure, along with an assessment of its stability limits. The method considers beams with distributed inertial masses, concentrated masses, and solid bodies as harmonic elements, which allows the dynamic models of structures carrying technological equipment to be created. This approach avoids the need for constructing discretized models, which entail the estimation of discretization errors and various computational challenges. In the case of reinforced concrete structures, the necessary longitudinal forces can be generated by prestressing the reinforcement.

Keywords: natural oscillations, longitudinal forces, prestresses, harmonic elements, safety of structures

For citation: Sobolev V.I., Karmazinov D.A., Chernigovskaya T.N. Harmonic element method for calculation of operating safety of structures. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(2):348-358. (In Russ.). <https://elibrary.ru/qzaena>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-348-358>.

ВВЕДЕНИЕ

Основой механических колебаний является знакопеременное движение динамической системы. Динамическая система определяется как совокупность объектов, обладающих массой и способных к относительному движению.

Большинство повреждений строительных конструкций вызвано возникновением вибрации. По этой причине проектировщики ставят перед собой задачу ограничить влияние вибрационных процессов на проектируемые строительные конструкции, главным образом посредством систем пассивной виброизоляции.

Однако вибрация как явление вызывается циклическими или внезапными силами, действующими отдельно или в сочетании с тепловыми, статическими или другими факторами. Это особенно важно в силу того, что периодические силы и моменты могут вызывать вынужденные упругие колебания, оказывающие особенно разрушительный эффект при возникновении резонанса. Поскольку большинство виброактивного оборудования, размещаемого в промышленных (грохота, дробилки) и гражданских (грузовые и пассажирские лифты) зданиях, генерирует вибрации частоты, близкой к собственной частоте означенных выше сооружений, проблема резонанса оказывается особенно острой.

Также следует отметить, что увеличение производительности машин приводит к повышению скоростей, увеличению энергопотребления и усложнению рабочих процессов и структурных конструкций. В результате характер вибрации в современных машинах становится все более сложным, а вибрационные нагрузки на элементы строительных конструкций возрастают.

Все это приводит к потребности в формировании устойчивых методов воздействия на инерционные параметры виброактивных систем, с целью изменения частоты колебаний этих систем. Последнее обстоятельство позволяет вывести колебательный процесс из резонансной зоны и тем самым значительно снизить нагрузки на несущие конструкции здания.

Моделирование динамических процессов, протекающих в системах с нерегулярным распределением границ областей и нерегуляр-

ными граничными условиями - деформируемых объектов и конструкций различного назначения осуществляется, как правило, путем представления их инерционных параметров как дискретной совокупности их значений. Такая дискретизация представляет собой процесс разделения непрерывной расчетной схемы на дискретные элементы с целью анализа ее динамического поведения и инерционного отклика. Такая дискретизация является фундаментальным шагом в анализе динамики зданий, особенно при изучении реакции конструкций на динамические нагрузки, такие как землетрясения или ветер.

Инерционные параметры, такие как параметры массы и жесткости, характеризуют распределением или континуальностью. Путем дискретизации этих параметров непрерывная конструкция разделяется на более мелкие, взаимосвязанные элементы, каждый из которых обладает своими собственными свойствами массы и жесткости. Этими элементами могут быть балки, колонны, стены, плиты перекрытия или любые другие конструктивные элементы, из которых состоит здание или сооружение.

Для дискретных механических систем характерны следующие плюсы:

1. Гибкость анализа: Дискретизация позволяет применять широкий спектр методов анализа, специально адаптированных для дискретных элементов. Эти методы включают анализ методом конечных элементов, методы конечных разностей и другие численные методы.

2. Универсальность моделирования: Дискретизация обеспечивает универсальные возможности моделирования. Инженеры могут представлять различные типы конструктивных компонентов, таких как балки, колонны, плиты перекрытия и стены, соответствующими типами элементов.

3. Вычислительная эффективность: Дискретизация структуры позволяет использовать эффективные вычислительные алгоритмы и численные методы, специально разработанные для дискретных элементов.

При всех преимуществах данного подхода, в числе которых можно привести возможность

получения достаточно точного решения уравнений динамики для подобного рода дискретизированных систем, очевидны и его недостатки:

1. Оценка точности дискретизации модели может оказаться весьма затруднительной [1].

2. При возможном значительном числе учитываемых узловых точек пропорционально вырастает размерность дискретной модели, что неизменно влечет за собой затруднение анализа обусловленности вибрационных процессов [2].

3. Получение адекватного действительности частотного спектра модели находится в прямой зависимости от количества узловых точек, являющихся средоточием инерционных характеристик в рассматриваемой системе, а также от способа дискретизации исходной системы [3, 4].

Метод гармонических элементов может быть предложен в качестве средства устранения недостатков, связанных с дискретизацией инерционных параметров при решении динамических задач, главным образом для повы-

шения точности конечных результатов. Этот метод основан на методе динамической податливости [5, 6], являющийся в сущности своей развитием метода перемещений и применяемый для аналитического описания систем, подверженных воздействию виброактивных сил.

МЕТОДЫ

Установим определение введенного ранее термина «гармонический элемент» (ГаЭ). Так, гармонический элемент относится к модификациям конечного элемента [7–16], которая содержит, помимо прочего, в качестве параметров частоту внешнего воздействия ω и распределенную массу ρ . Гармонические элементы используются для получения аналитического представления колебательных форм как функций параметров ω и N с их последующим анализом. В целях демонстрации мы рассмотрим полный набор аналитических преобразований, относящихся к элементу типа шарнир-шарнир (Ш-Ш), представленного на рис. 1.



Рис. 1. Расчетная схема балки вида «шарнир – шарнир»
Fig. 1. The design scheme of the beam of the "hinge - hinge" type

Упомянутый выше термин «метод гармонических элементов» можно считать уместным, поскольку, сохраняя те же свойства и методы решения, что и метод конечных элементов, он также учитывает частотные эффекты и распределенную массу. Это значительно упрощает анализ точности дискретизации в исходной системе и расширяет применимость результатов к более сложным моделям. В результате могут быть разработаны нетрадиционные методы виброизоляции, основанные на манипулировании инерционными параметрами, для получения форм вибрации со специфическими свойствами.

Следуя изложенным выше принципам, смоделируем вынужденные колебания балки с частотой ω под действием неизменной во времени продольной силы N . Также условимся обозначать длину рассматриваемой балки

литерой a , погонную массу литерой c и жесткость как EJ . Приведем внешнее воздействие, наложенное на балку, к совокупности сосредоточенных силовых факторов, приложенных в ее граничных точках (узлах). В таком случае весь механический процесс, совершаемый балкой под воздействием внешних силовых факторов, можно определить как колебательный. При этом колебания выполняются под воздействием сосредоточенных гармонических сил и моментов. Если предположить, что сколь угодно близкие узлы балки не взаимодействуют между собой, то равновесие ее элементарного участка в пролетной зоне можно описать с помощью уравнения Эйлера-Бернулли¹

$$\rho \cdot V_{tt} + EJ \cdot V_{xxxx} = 0, \quad (1)$$

При заданной частоте внешнего воздей-

ствия ω справедливо следующее расширение данного уравнения:

$$\rho \cdot V_{xx} + EJ \cdot V_{xxxx} - N \cdot V_{xx} = 0. \quad (2)$$

Для гармонического элемента, в отличие от обыкновенного конечного элемента, оказывается справедливым следующее обстоятельство.

Единичное гармоническое перемещение каждой связи вызывает отклик во всех наложенных связях, при этом несущественным является факт статической определимости рассматриваемого конечного элемента. Данное свойство гармонических элементов позволяет сформировать невырожденную матрицу жесткостей и для статически определимых элементов, что открывает возможность для описания динамических характеристик подобных систем. Указанные выше реакции, расположенные последовательно в соответствии с номерами связей, образуют вектор R_i , представляющий амплитуды гармонических реакций внутри связей. Поочередное гармоническое перемещение связей формирует матрицу динамических реакций $R = \{R_1, R_2, R_3\}$. В свою очередь, манипулируя значением внешней продольной силы N возможно не только изменить частоту собственных колебаний и колебательную форму элемента, но и получить

колебательную форму с заранее определенными свойствами. Следовательно, такой подход может быть положен в основу методики снижения интенсивности вибраций, позволяя в некоторых случаях и вовсе устранить таковые.

Данный метод виброизоляции, основанный на управлении характеристиками колебательной системы (объекта управления) при помощи внешнего продольного воздействия (управляющее устройство), и проиллюстрирован в рамках данной работы.

При заданной частоте внешнего воздействия ω колебательные формы балки однозначно определяются вектором амплитуд узловых гармонических перемещений в котором компоненты расположены по порядку нумерации соответствующих связей.

$$Y = (Y(0), Y_{xx}|_{x=0}, Y(a), Y_{xx}|_{x=a})^T, \quad (3)$$

Выражение (3) в сущности описывает более общий сценарий наложения связей на балку в количестве четырех штук.

Данный вариант представлен на рис. 2.

Учитывая, что в варианте Ш-Ш угловые связи отсутствуют, допустимо сделать следующее уточнение: $Y_{xx}|_{x=0} \equiv 0$ и $Y_{xx}|_{x=a} \equiv 0$.



Рис. 2. Нумерации связей стержня с жесткими узлами
Fig. 2. Numbering of rod connections with rigid nodes

Вектор $Y \sin \omega t$ определяет граничные условия, используемые для получения однозначного решения уравнения (2).

Поочередное гармоническое перемещение связей формирует матрицу динамических реакций

$$R = \{R_1, R_2\}.$$

Подставим искомое решение вида

$$V(x) = Y(x) \sin(\omega t)$$

в уравнение (2). Сократив полученное уравне-

ние на $\sin(\omega t)$, получим:

$$Y^{(IV)}(x) - \frac{NY^{(2)}(x)}{EJ} - Y(x) \frac{\omega^2 \rho}{EJ} = 0. \quad (4)$$

Характеристическое уравнение для (4) имеет вид:

$$\mu^4 - \frac{N}{EJ} \mu^2 - \frac{\omega^2 \rho}{EJ} = 0.$$

Определив

¹Погорелов В.И. Строительная механика тонкостенных конструкций: учебное пособие для вузов. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 518 с.

$$\mu^2_{12} = -\frac{N}{2EJ} \pm \sqrt{\frac{N^2}{4(EJ)^2} + \frac{\omega^2 \rho}{EJ}},$$

имеем

$$\mu_1 = q, \quad \mu_2 = -q, \quad \mu_3 = is, \quad \mu_4 = -is$$

где

$$q = \sqrt{-\frac{N}{2EJ} + \sqrt{\frac{N^2}{4(EJ)^2} + \frac{\omega^2 \rho}{EJ}}},$$

$$s = \sqrt{\frac{N}{2EJ} + \sqrt{\frac{N^2}{4(EJ)^2} + \frac{\omega^2 \rho}{EJ}}}.$$

Общее решение $Y(x)$ уравнения (4) может быть представлено в виде линейной комбинации

$$Y(x) = H(x)\vec{C} \quad (5)$$

четырёх линейно независимых частных решений, образующих базисную вектор функцию

$$H(x) = (e^{qx}, e^{-qx}, \sin(sx), \cos(sx)),$$

где C является вектором коэффициентов линейной комбинации (5).

Краевые условия для решения уравнения (4) могут быть заданы в виде вектора (3). Матрицы C и L (матриц векторов амплитуд единичных перемещений) имеют вид:

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{13} \\ c_{21} & c_{23} \\ c_{31} & c_{33} \\ c_{41} & c_{43} \end{pmatrix}; \quad L = \begin{pmatrix} I & O \\ O & O \\ O & I \\ O & O \end{pmatrix}.$$

Элементы матрицы C определяются из решения систем уравнений:

$$AC = L, \quad (6)$$

где A – матрица, образованная из базисной вектор функции $H(x)$ следующим образом:

$$A = \begin{pmatrix} H(0) \\ H_{xx}(x)|_{x=0} \\ H(a) \\ H_{xx}(x)|_{x=a} \end{pmatrix}.$$

Матрица амплитуд реакций в связях (матрица гармонических реакций [18]) определяется в виде

$$R = EJC^T H \quad (7)$$

$$\text{где } H = (H_{xxx}^T(x)|_{x=0}, -H_{xxx}^T(x)|_{x=a}).$$

Вектор столбец Y амплитуд узловых перемещений найдется как

$$RY = F, \text{ или } EJ(A^{-1}L)^T H = F.$$

Функция амплитуд перемещений оси балки (функция формы вынужденных колебаний) при заданной узловой форме F силового гармонического воздействия имеет вид

$$Y(x) = Y^T C^T H^T(x) \quad (8)$$

Для рассматриваемого случая шарнирного закрепления балки в узлах матрица краевых условий примет вид

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ q^2 & q^2 & 0 & -s^2 \\ e^{aq} & e^{-aq} & \sin(a \cdot s) & \cos(a \cdot s) \\ q^2 \cdot e^{aq} & q^2 \cdot e^{-aq} & -s^2 \cdot \sin(a \cdot s) & -s^2 \cdot \cos(a \cdot s) \end{pmatrix} \quad (9)$$

Учитывая (9), из (6) имеем

$$C = \frac{1}{q^2 + s^2} \cdot \begin{pmatrix} -\frac{s^2 e^{-aq}}{2 \cdot \sinh(a \cdot q)} & \frac{s^2}{2 \cdot \sinh(a \cdot q)} \\ \frac{2 \cdot \sinh(a \cdot q)}{s^2 e^{aq}} & -\frac{2 \cdot \sinh(a \cdot q)}{s^2} \\ -q^2 \cdot \frac{\cos(a \cdot s)}{\sin(a \cdot s)} & \frac{q^2}{2 \cdot \sin(a \cdot s)} \\ \frac{q^2}{2 \cdot \sin(a \cdot s)} & 0 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Подставляя полученную матрицу коэффициентов, для опорных реакций балки при динамическом воздействии в (7), имеем

$$R_{11} = \frac{EJ \cdot s^2 \cdot q^2}{s^2 + q^2} \cdot s \cdot \cot(a \cdot s) - q \cdot \coth(a \cdot q) \quad (11)$$

$$R_{12} = \frac{EJ \cdot s^2 \cdot q^2}{s^2 + q^2} \cdot \frac{q}{\sinh(a \cdot q)} - \frac{s}{\sinh(a \cdot q)} \quad (12)$$

$$R_{21} = \frac{EJ \cdot s^2 \cdot q^2}{s^2 + q^2} \cdot \frac{q}{\sinh(a \cdot q)} - \frac{s}{\sinh(a \cdot q)} \quad (13)$$

$$R_{22} = \frac{EJ \cdot s^2 \cdot q^2}{s^2 + q^2} \cdot s \cdot \cot(a \cdot s) - q \cdot \coth(a \cdot q) \quad (14)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С целью анализа влияния продольного воздействия, приложенного к шарнирно опертой балке, рассмотрим графическую интерпретацию выражений (11–14). Так, на рис. 3 и 4 представлены графики зависимости R_{11} и R_{12} как функций от параметров продольного воздействия N и ω . Так, из графика на рис. 3 видно, что функция R_{11} характеризуется монотонным убыванием в областях между линиями разрыва. Данное обстоятельство равносильно существованию так называемых нулевых линий – линий нулевых значений амплитуд [18, 19] динамических реакций системы. Продолжая анализ приведенного на рис. 3 графика, следует также отметить, что пересечение первой от начала координат нулевой линии оси N формирует условие потери устойчивости си-

стемой. Это означает, что при сколь угодно малой частоте внешнего воздействия реакции в связях системы не возникают. Данное обстоятельство также может быть важно с точки зрения анализа механических систем, находящихся под внешним воздействием. Таким образом, задавая для частоты внешнего воздействия определенное значение продольного силы можно снизить (или же обратить в ноль)

значение динамической реакций R_{11} и R_{22} . Последнее утверждение можно дополнительно проиллюстрировать с использованием графика на рис. 5. Для него принято, что частота внешнего воздействия постоянна и равна 100 условным единицам, а параметры системы принимают следующие значения: $EJ = 10$, $\rho = 10$, $a = 10$.

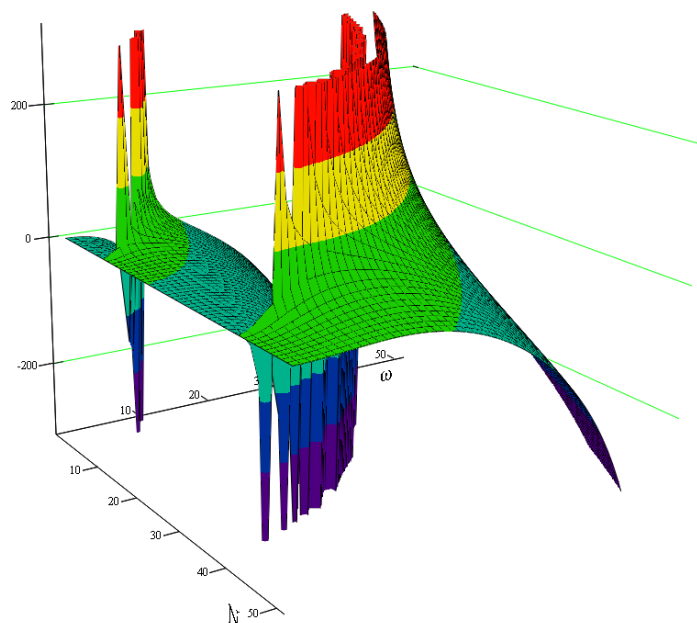


Рис. 3. График реакции $R_{11}(N, \omega)$
 Fig. 3. Reaction schedule $R_{11}(N, \omega)$

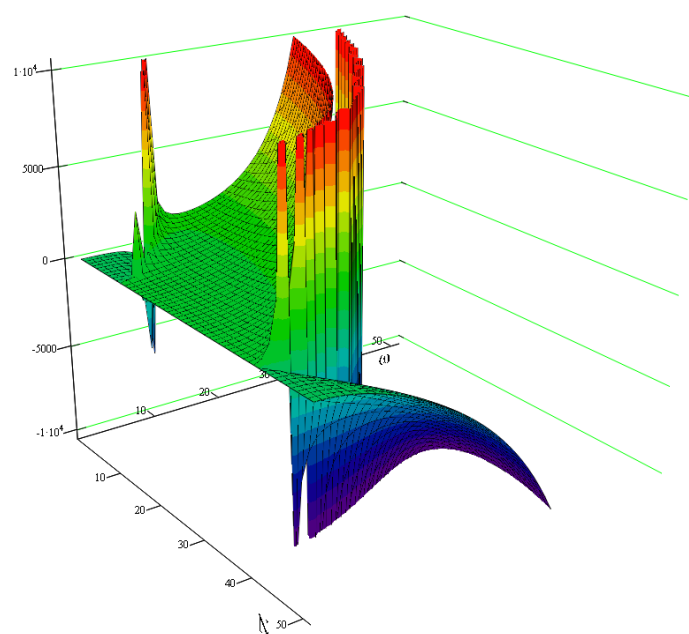


Рис. 4. График реакции $R_{12}(N, \omega)$
 Fig. 4. Reaction schedule $R_{12}(N, \omega)$

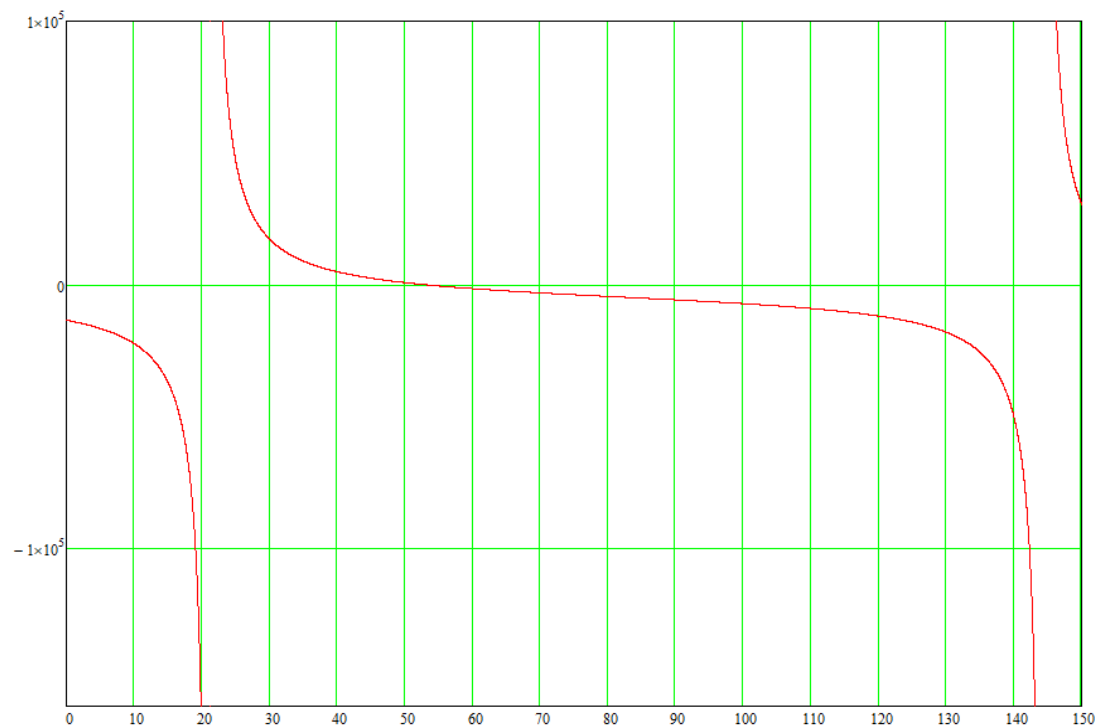


Рис. 5. График зависимости $R_{11}(N, \omega)$ при фиксированном $\omega=100$
 Fig. 5. Dependency graph $R_{11}(N, \omega)$ with a fixed $\omega=100$

На рис. 5 видно, что при продольном воздействии на систему, численно равному $N=55$, значение $R_{11}(N, \omega)$ (равно как и значение $R_{22}(N, \omega)$) обращается в ноль. Однако обратить в ноль реакции $R_{12}(N, \omega)$ и $R_{21}(N, \omega)$ не представляется возможным, что напрямую следует из формы графика этих функций, представленном на рис. 4. В самом деле, поверхность, представленная на данном рисунке характеризуется чередованием областей вогнутости и выпуклости, асимптотически стремящихся к поверхностям разрыва функции и не пересекающих плоскость $N=0$. Таким образом, изменяя значения N представляется возможным лишь уменьшить, но не обратить в ноль значение соответствующих функций реакций.

Из сказанного выше следует, что решение уравнения Эйлера-Бернулли для систем, находящихся под воздействием некоторой продольной силы, обладает значительным потенциалом с точки зрения создания систем активной виброизоляции. Данные системы позволяют решать задачу уменьшения влияния виброактивных систем в более широком спектре частот колебаний в сравнении с системами пассивной виброизоляции, как это следует из анализа рис. 4 и 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке систем виброзащиты, допускающих линейную интерпретацию колеба-

тельного процесса, крайне перспективным оказывается использование гармонического элемента [20]. Применение данной формализации влечет за собой ряд преимуществ. Во-первых, используя метод гармонических элементов, можно свести к минимуму влияние ошибок дискретизации на инерционные параметры системы. Это особенно полезно при решении динамических задач, поскольку неточное представление инерционных параметров может привести к ошибочным результатам.

Также одним из заметных преимуществ метода гармонических элементов является его способность аналитически представлять колебательные формы, связывая решения уравнений динамического состояния с амплитудами гармонических реакций в наложенных соединениях. Такое аналитическое представление упрощает анализ точности выборки в исходной системе, позволяя более эффективно оценивать поведение системы.

Кроме того, метод гармонических элементов позволяет обобщать результаты на более сложные модели. Это означает, что решения, полученные с помощью этого метода, могут быть применены к системам с различными конфигурациями и свойствами, расширяя его применимость за пределы простых моделей.

Наконец, метод гармонических элементов открывает возможности для нетрадиционных методов виброизоляции [21–29]. Манипулируя

инерционными параметрами системы, становится возможным формировать колебательные формы с заданными свойствами. Это предлагает новый подход к контролю вибрации, при котором реакция системы может быть адаптирована таким образом, чтобы эффективно снижать или устранять нежелательные вибрации.

Таким образом, метод гармонических элементов устраняет ограничения дискретизации при решении динамических задач путем включения как сосредоточенных, так и распределенных параметров в качестве инерционных величин. Он сохраняет свойства метода конечных элементов, позволяя при этом аналитически представлять формы колебаний и облегчая нетрадиционные методы виброизоляции. Такой подход обеспечивает повышенную точность, гибкость и контроль при анализе и

проектировании динамических систем.

Используя данный тип конечного элемента становится возможным получить точное аналитическое выражение динамических реакций как функций продольного внешнего силы и частоты внешнего воздействия.

Последнее обстоятельство открывает возможности для управления значениями опорных реакций стержневой системы при помощи изменения значений продольной силы N .

Таким образом, полученные результаты позволяют говорить об эффективности управления динамическими параметрами колебаний балочных систем при помощи внешней продольной силы, формирование которой возможно при помощи предварительных напряжений арматуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Максимов В.П. К вопросу о точности восстановления параметров линейных динамических моделей с дискретным временем // Вестник Пермского университета. Серия: Экономика. 2018. Т. 13. № 4. С. 502–515. <https://doi.org/10.17072/1994-9960-2018-4-502-515>.
2. Орлов М.Р., Морозова Л.В. Исследование характера разрушения валов винта из стали 40ХН2МА // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 6. С. 44–51. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-6-44-50>.
3. Монахов В.А., Зайцев М.Б. Определение напряженно-деформированного состояния стержневой системы на основе принципа двойственности // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 4 (49). С. 96–102. https://doi.org/10.54734/20722958_2021_4_96.
4. Барановский А.М., Щербакова О.В., Пахомова Л.В., Викулов С.В. Метод дискретизации при расчете валов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2020. № 1-2. С. 28–31.
5. Черниговская Т.Н. Численные математические модели стационарных установившихся колебаний тонких упругих пластин с распределенными инерционными параметрами // Математика, ее приложения и математическое образование (МПМО-17): материалы VI Международной конференции (г. Улан-Удэ – Байкал, 26 июня–01 июля 2017 г.). Улан-Удэ – Байкал: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2017. С. 375–378.
6. Соболев В.И., Черниговская Т.Н. Построение прямоугольного гармонического элемента для моделирования колебаний тонкой пластины // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2007. № 4 (16). С. 28–32.
7. C. Farhat, F.-X. Roux, A method of finite element tearing and interconnecting and its parallel solution algorithm, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 32 (6) (1991) 1205–1227.
8. P. G. Ciarlet, *The finite element method for elliptic problems*, SIAM, 2002.
9. Gunzburger, C. Vollmann, *A cookbook for finite element methods for nonlocal problems, including quadrature rule choices and the use of approximate neighborhoods*, arXiv:2005.10775 (2020).
10. C. Pechstein, *Finite and Boundary Element Tearing and Interconnecting Solvers for Multiscale Problems*, Vol. 90 of *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*, Springer Berlin Heidelberg.
11. S. C. Brenner and L.R. Scott, *The Mathematical Theory of Finite Element Methods* (3rd Edition). Springer Verlag, New York, 2008.
12. S.C. Brenner and L.-Y. Sung, *A new convergence analysis of finite element methods for elliptic distributed optimal control problems with pointwise state constraints*, *SIAM J. Control Optim.*, 55(2017), no. 4, 2289–2304.
13. S.C. Brenner, L.-Y. Sung and W. Wollner, *Finite element methods for one dimensional elliptic distributed optimal control problems with pointwise constraints on the derivative of the state*, *Optim. Engrg.*, 22(2021), no. 4, 1989–2008.
14. F. Brezzi, W. Hager and P. Raviart, *Error estimates for the finite element solution of variational inequalities*, Part I. *Primal theory*, *Numer. Math.*, 28(1977), 431–443.
15. P.G. Ciarlet, *The finite element method for elliptic problems*. Amsterdam: North-Holland; 1978.
16. K. Deckelnick, A. Gunther and M. Hinze, *Finite element approximation of elliptic control problems with constraints on the gradient*, *Numer. Math.*, 111(2009), 335–350.
17. Паймушин В.Н., Фирсов В.А., Шишкин В.М.

Моделирование динамической реакции при резонансных колебаниях удлиненной пластины с интегральным демпфирующим покрытием // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 1. С. 74–86. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.1.06>.

18. Соболев В.И. Дискретно-континуальные динамические системы и виброизоляция промышленных грохотов. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного технического университета, 2002. 202 с.

19. Асет А., Мансурова М.Е., Жмудь В.А. Управление нелинейным объектом со многими нелинейными обратными связями // Автоматика и программная инженерия. 2022. № 2 (40). С. 71–87.

20. Соболев В.И., Черниговская Т.Н. Алгоритм формирования гармонического элемента в моделировании колебаний тонкой пластины // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. № 2 (18). С. 29–35.

21. Булаев В.А., Лебедева О.С., Кочетов М.В. Элементы систем виброизоляции в конструкциях сейсмостойких зданий // Инновационные процессы в научной среде: сборник статей Международной научно-практической конференции (г. Новосибирск, 08 декабря 2016 г.). Ч. 3. Новосибирск: ОМЕГА САЙНС, 2016. С. 23–25.

22. Канев Н.Г. Прогноз вибрации рельсового транспорта при проектировании виброизоляции фундаментов зданий // Фундаменты. 2020. № 2. С. 51–52.

23. Базаров И.М. Система виброизоляции здания // Technical Innovations. 2021. № 7. С. 135–137.

24. Суслова К.Ю. Виброизоляция в сейсмостойких зданиях // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 92-15. С. 94–97. <https://doi.org/10.18411/trnio-12-2022-706>.

25. Повколос К.Э. Оценка эффективности некоторых способов виброизоляции существующих зданий и сооружений от вибродинамических воздействий, распространяющихся в грунтовой среде // Наука и техника. 2023. Т. 22. № 2. С. 131–140. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-2-131-140>.

26. Алехин В.Н., Антипин А.А., Городилов С.Н., Пастухова Л.Г. Анализ виброизоляции многоэтажного здания от воздействия метрополитена // Экономические и технические аспекты безопасности строительных критических инфраструктур (SAFETY2015): материалы Международной конференции (г. Екатеринбург, 10–11 июня 2015 г.). Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; НИЦ Надежность и ресурс больших систем и машин УрО РАН. Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2015. С. 42–46.

27. Bartolozzi F. Natural frequency automatic variation in seismic isolation system // Technical Acoustics. 2004. Vol. 18. P. 185–200.

28. Василевич Ю.В., Кириленко А.Т., Неумержицкий В.В., Неумержицкая Е.Ю. Виброизоляция зданий, расположенных в технической зоне метрополитена неглубокого заложения // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2016. № 1(32). С. 295–297.

29. Филитова А.А., Криволапов И.П. Основы расчета систем виброизоляции промышленного оборудования общественных зданий и сооружений // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: материалы Международной научно-практической конференции (г. Мичуринск, 25–27 октября 2017 г.). Мичуринск: Мичуринский государственный аграрный университет, 2017. С. 94–96.

REFERENCES

1. Maksimov V.P. On the issue of the accuracy of restoring the parameters of linear dynamic models with discrete time. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Ekonomika = Bulletin of the Perm University. Series: Economy*. 2018;13(4):502-515. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/1994-9960-2018-4-502-515>.

2. Orlov M.R., Morozova L.V. Investigation of the nature of the destruction of propeller shafts made of steel 40KhN2MA. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Factory laboratory. material diagnostics*. 2018;84(6):44-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-6-44-50>.

3. Monakhov V.A., Zaitsev M.B. Determination of the stress-strain state of a rod system based on the principle of duality. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo = Regional architecture and construction*. 2021;4:96-102. (In Russ.). https://doi.org/10.54734/20722958_2021_4_96.

4. Baranovskii A.M., Shcherbakova O.V.,

Pakhomova L.V., Vikulov S.V. Discretization method for calculating shafts. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka = Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*. 2020:1-2:28-31. (In Russ.).

5. Chernigovskaya T.N. Numerical mathematical models of stationary steady oscillations of thin elastic plates with distributed inertial parameters. In: *Matematika, ee prilozheniya i matematicheskoe obrazovanie (MPMO-17): materialy VI Mezhdunarodnoi konferentsii = Mathematics, its applications and mathematical education (MPMO17): Proceedings of the VI International Conference*. 26 June – 01 July 2017, Ulan-Ude - Baikal. Ulan-Ude - Baikal: East Siberian State University of Technology and Management; 2017. P. 375-378. (In Russ.).

6. Sobolev V.I., Chernigovskaya T.N. Construction of a rectangular harmonic element for modeling the vibrations of a thin plate. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern technolo-*

- gies. *System analysis. Modeling*. 2007;4:28-32. (In Russ.).
7. C. Farhat, F.-X. Roux, A method of finite element tearing and interconnecting and its parallel solution algorithm, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 32 (6) (1991) 1205–1227.
8. P. G. Ciarlet, *The finite element method for elliptic problems*, SIAM, 2002.
9. Gunzburger, C. Vollmann, A cookbook for finite element methods for nonlocal problems, including quadrature rule choices and the use of approximate neighborhoods, arXiv:2005.10775 (2020).
10. C. Pechstein, *Finite and Boundary Element Tearing and Interconnecting Solvers for Multiscale Problems*, Vol. 90 of *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*, Springer Berlin Heidelberg.
11. S. C. Brenner and L.R. Scott, *The Mathematical Theory of Finite Element Methods* (3rd Edition). Springer Verlag, New York, 2008.
12. S.C. Brenner and L.-Y. Sung, A new convergence analysis of finite element methods for elliptic distributed optimal control problems with pointwise state constraints, *SIAM J. Control Optim.*, 55(2017), no. 4, 2289–2304.
13. S.C. Brenner, L.-Y. Sung and W. Wollner, Finite element methods for one dimensional elliptic distributed optimal control problems with pointwise constraints on the derivative of the state, *Optim. Engrg.*, 22(2021), no. 4, 1989–2008.
14. F. Brezzi, W. Hager and P. Raviart, Error estimates for the finite element solution of variational inequalities, Part I. Primal theory, *Numer. Math.*, 28(1977), 431–443
15. P.G. Ciarlet, *The finite element method for elliptic problems*. Amsterdam: North-Holland; 1978.
16. K. Deckelnick, A. Gunther and M. Hinze, Finite element approximation of elliptic control problems with “ constraints on the gradient, *Numer. Math.*, 111(2009), 335–350.
17. Paimushin V.N., Firsov V.A., Shishkin V.M. Simulation of dynamic response during resonant vibrations of an elongated plate with an integral damping coating. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika = Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*. 2020;1:74–86. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.1.06>.
18. Sobolev V.I. *Discrete-continuum dynamic systems and vibration isolation of industrial screens*. Irkutsk: PH of the Irkutsk State Technical University; 2002. 202 p.
19. Aset A., Mansurova M.E., Zhmud' V.A. Control of a nonlinear plant with many nonlinear feedbacks. *Avtomatika i programmaya inzheneriya = Automation and program engineering*. 2022;2:71–87. (In Russ.).
20. Sobolev V.I., Chernigovskaya T.N. Algorithm for the formation of a harmonic element in the simulation of oscillations of a thin plate. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2008;2:29–35. (In Russ.).
21. Bulaev V.A., Lebedeva O.S., Kochetov M.V. Elements of vibration isolation systems in structures of earthquake-resistant buildings. In: *Innovatsionnye protsessy v nauchnoi srede: sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Innovative processes in the scientific environment: collection of articles of the international scientific and practical conference*. Part 3. 08 December 2016, Novosibirsk. Novosibirsk: Omega sciences LLC; 2016. p. 23–25. (In Russ.).
22. Kanev N.G. Forecast of vibration of rail transport in the design of vibration isolation of building foundations. *Fundamenty = Foundations*. 2020;2:51–52. (In Russ.).
23. Bazarov I.M. Building vibration isolation system. *Technical Innovations*. 2021;7:135–137. (In Russ.).
24. Suslova K.Yu. Vibration isolation in earthquake-resistant buildings. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya = Trends in the development of science and education*. 2022;92:15:94–97. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18411/trnio-12-2022-706>.
25. Povkolas K.E. Evaluation of the effectiveness of some methods of vibration isolation of existing buildings and structures from vibrodynamic influences propagating in the ground environment. *Nauka i tekhnika = Science and Technology*. 2023;22(2):131–140. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-2-131-140>.
26. Alekhin V.N., Antipin A.A., Gorodilov S.N., Pastukhova L.G. Analysis of vibration isolation of a multi-storey building from the impact of the subway. In: *Ekonomicheskie i tekhnicheskie aspekty bezopasnosti stroitel'nykh kritichnykh infrastruktur (SAFETY2015): materialy Mezhdunarodnoi konferentsii = Economic and technical aspects of safety of construction critical infrastructures (SAFETY2015): materials International Conference*. 10–11 June 2015, Yekaterinburg. Yekaterinburg: Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin; SIC Reliability and Resource of Large Systems and Machines of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Edited by V. N. Alyokhin. Yekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; 2015. p. 42–46.
27. Bartolozzi F. Natural frequency automatic variation in seismic isolation system. *Technical Acoustics*. 2004;18:185–200.
28. Vasilevich Yu.V., Kirilenko A.T., Neumerzhitskii V.V., Neumerzhitskaya E.Yu. Vibration isolation of buildings located in the technical zone of the metro of shallow laying. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport = Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport*. 2016;1:295–297. (In Russ.).
29. Filitova A.A., Krivolapov I.P. Fundamentals of calculation of vibration isolation systems for industrial

equipment of public buildings and structures. In: *In-zhenernoe obespechenie innovatsionnykh tekhnologii v APK: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Engineering*

support of innovative technologies in agriculture : Materials of the international scientific and practical conference. 25-27 October, Michurinsk. Michurinsk: Michurinsk State Agrarian University; 2017. p. 94-96.

Информация об авторах

Information about the authors

Соболев Владимир Иванович,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры механики
и сопротивления материалов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: vladsobol@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0916-1604>

Vladimir I. Sobolev,
Dr. Sci (Eng.), Professor, Professor
of the Department of Mechanics
and Resistance of Materials,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: vladsobol@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0916-1604>

Кармазинов Данил Андреевич,
инженер-конструктор
ООО «СтройПроектСервис»,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: dkarmazinov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-1803-1270>

Danil A. Karmazinov,
Design Engineer
of StroyProektService LLC,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: dkarmazinov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-1803-1270>

Черниговская Татьяна Николаевна,
старший преподаватель кафедры
математики,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15,
Россия,
e-mail: tannikch@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-1525-4663>

Tatyana N. Chernigovskaya,
Senior Lecturer
of the Department of Mathematics,
Irkutsk State Transport
University,
15 Chernyshevskogo St., Irkutsk 664074,
Russia,
e-mail: tannikch@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-1525-4663>

Вклад авторов

Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Information about the article

Статья поступила в редакцию 02.03.2023.
Одобрена после рецензирования 30.03.2023.
Принята к публикации 31.03.2023.

The article was submitted 02.03.2023.
Approved after reviewing 30.03.2023.
Accepted for publication 31.03.2023.

**Современное состояние, перспективы и пути развития
систем водоснабжения и водоотведения, методы
их расчета, построения и организации эксплуатации****В.Р. Чупин**

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. В статье обсуждаются современные проблемы развития технологии формирования и организации функционирования систем водоснабжения и водоотведения, производится оценка достигнутых результатов, формируются цели и задачи дальнейших исследований. В связи с происходящими процессами Цифровизации и интеллектуализации социальных и технологических систем предлагается новая концепция построения и управления функционированием, развитием и консервацией систем водоснабжения и водоотведения населенных мест, городов и зданий. Эта концепция базируется на создании цифровых двойников всех элементов системы и ее подсистем, на управление ими в реально-виртуальном пространстве с использованием облачных технологий и специализированных программных комплексов. Для этих целей системы водоснабжения и водоотведения рассмотрены с позиции общих принципов организации, гидравлического расчета, формирования режимов эксплуатации, вероятностного характера отборов воды и поступления сточных вод, неопределенности в поведении и перспективных нагрузках сооружений, и с учетом других свойств, характерных для больших и сложных систем. В работе изложены основные задачи расчета и конструирования систем водоснабжения и водоотведения и кратко представлены методы их решения, которые реализованы в соответствующих программных комплексах, апробированных на практике и внедрены в реальный процесс проектирования, эксплуатации и консервации трубопроводных систем жилищно-коммунального хозяйства. Все оптимизационные модели основаны на критерии стоимости жизненного цикла систем водоснабжения и водоотведения.

Ключевые слова: системы водоснабжения и водоотведения, методы моделирования и оптимизации, программная реализация и апробация

Для цитирования: Чупин В.Р. Современное состояние, перспективы и пути развития систем водоснабжения и водоотведения, методы их расчета, построения и организации эксплуатации // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 359–368. <https://elibrary.ru/byrind>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-359-368>.

Original article**Current state and prospects of water supply and sanitation systems,
methods for their calculation, design, and operation****Victor R. Chupin**

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Abstract. The paper considers modern problems of developing a technology for managing water supply and sanitation systems. The main results achieved in this sphere are presented, and objectives for further research are outlined. Due to the ongoing processes of digitalization and intellectualization of social and technological systems, a new concept of design and operation management, development and conservation of water supply and sanitation systems of settlements, cities, and buildings is proposed. This concept is based on the creation of digital twins of all system and subsystem elements and their management in real and virtual space using cloud technologies and specific software systems. For

these purposes, water supply and sanitation systems are considered from the perspective of general principles of organization, hydraulic calculation, formation of operation modes, the probabilistic nature of water withdrawals and wastewater inflows, uncertainty in the behavior and prospective loads of facilities, along with other characteristics typical of large and complex systems. The paper presents the main tasks for calculating and designing water supply and sanitation systems and briefly describes possible solutions, implemented in the relevant software packages, tested in practice in the actual process of designing, operating, and maintenance of piping systems of a housing and utilities infrastructure. All optimization models are based on the lifecycle cost criteria for water and sanitation systems.

Keyword: water supply and sanitation systems, modeling and optimization methods, software implementation and testing

For citation: Chupin V.R. Current state and prospects of water supply and sanitation systems, methods for their calculation, design, and operation. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'* = *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(2):359-368. (In Russ.). <https://elibrary.ru/byrind>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-359-368>.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими составляющими и основой жизнеобеспечения любого города и промышленного предприятия являются современные системы водоснабжения и водоотведения (СВВ). От эффективности их работы зависит не только благополучие населения, но и здоровье людей, а также безопасность территории, на которой они проживают. Водоснабжение и водоотведение относятся к системам массового обслуживания и призваны удовлетворять возрастающей потребности во воде и водоотведении всего населения. Современные СВВ относятся к большим системам и обладают свойствами масштабности и распределенности, иерархичности и целостности, динамичности и гибкости, устойчивости и адаптивности и др. Соответственно, и цифровые двойники должны обладать этими свойствами, или быть способными их моделировать и воспроизводить. По сравнению с историей создания и развития систем водоснабжения и водоотведения процесс их Цифровизации можно считать, что только начался. Еще не сформировались единые подходы, не все технологические процессы оцифрованы и разработаны их математические модели. Тем не менее уже получены следующие результаты.

1. Математические модели и методы расчета распределения потоков в напорных системах водоснабжения с нефиксированными отборами воды

На основе «теории гидравлических цепей» разработаны новые модели и методы для расчета систем подачи и распределения воды, в которых расходы транспортируемой воды и потери напора по участкам сети, а также отборы воды у потребителей являются искомыми величинами (гидравлические цепи с нефиксированными отборами воды) [1–3]. Та-

кие модели и их реализация в виде программно-вычислительном комплексе (ПВК) ТРАСЕ ВК, позволяют моделировать всевозможные режимы работы системы, включая выход из строя участков сети и их каскадное отключение, разрывы и свищи и другие неполадки в сети и на сооружениях. Разработанные модели и методы позволяют вычислять объемы воды, которые будут получать или недополучат потребители при той, или иной аварии. Проигрывая всевозможные ситуации, можно оценить показатели надежности и наметить мероприятия по их увеличению. Рассматривая вероятностную природу водопотребления не сложно сформировать вероятностную модель функционирования системы водоснабжения, на основании которой можно оценить вероятности безотказного снабжения потребителей водой. Разработанные модели и методы и соответствующие программные комплексы являются основными инструментами в системе диспетчерского управления при контроле режимов и в системе обнаружения и локализации аварийных ситуаций.

2. Математические модели и методы расчета напорно-безнапорных режимов движения сточных вод в системах водоотведения

На основе «теории гидравлических цепей» разработаны новые модели и методы для формирования цифровых двойников систем водоотведения, которые позволяют моделировать все возможные режимы движения сточной жидкости в коллекторах и напорных трубопроводах, с учетом переполнения колодцев, выхода стоков на поверхность земли и движение их по улицам и площадям [4–6]. В системе диспетчерского управления на основе этих методов можно определять места засоров и зарастание в трубопроводах, места

образования анти уклонов и прогибов Новые модели и методы позволили провести исследования и показать, что применяемый в практике проектирования и законодательно утвержденный метод «предельных интенсивностей» для расчета ливневой канализации требует совершенствования. Как показали проведенные расчеты, принимая работу безнапорных коллекторов полным сечением (как это требует метод предельных интенсивностей), неизбежно приводит к выходу стоков на поверхность земли и к затоплению территории. Поэтому предложено дополнить «метод предельных интенсивностей» расчетами напорно-безнапорных режимов в безнапорных системах водоотведения с последующей коррекцией диаметров самотечных коллекторов. Такие модели и методы и их программная реализация является основным инструментом в системе диспетчерского управления СВВ города и решает задачи обнаружения и локализации засоров и заиливания участков сети. Ранее эти задачи не имели решения.

3. Методика обнаружения и локализации аварийных ситуаций в системах водоснабжения

Разработанная методика реализована в раках диспетчерского управления и позволяет на основе сопоставления фактических измеряемых давлений и их расчетных значений вычислять места образования свищей и запавших задвижек [7–9]. На системах водоснабжения г. Ангарска (Иркутской области) на основе данной методики удалось обнаружить 22 запавших задвижки. После восстановления задвижек напор в сети увеличился на 20% и отпала надобность в шести насосных подкачивающих станций, в которые было вложено более 900 млн руб.

4. Методика оценки надежности и повышения сейсмостойкости систем подачи воды потребителям и работы сооружений систем водоснабжения

В России имеются значительные территории с повышенной сейсмической активностью. Как показал анализ крупных землетрясений, катастрофические последствия от них возникают по причине выхода из строя систем водоснабжения и возникающие при этом пожары просто нечем потушить. Статистические данные и анализ крупных землетрясений свидетельствуют о том, что чем меньше диаметр трубопровода, тем больше его аварийность, сейсмостойкий материал труб из стеклопластика, менее подверженные сейсмическим воздействиям будут трубопроводы, расположенные на поверхности, либо над поверхностью земли, т.е. не заземленные грунтовыми

условиями. На основе этих данных разработана новая методика, которая позволяет формировать сейсмостойкие СВВ Эта методика была применена при обосновании параметров перспективной схемы водоснабжения г. Иркутска и Иркутского района (сейсмика 9 баллов). Учитывая стохастические свойства водопотребления и возникновения аварийных ситуаций разработаны комплексные модели оценки надежности работы системы водоснабжения и нормированы показатели безотказного снабжения каждого потребителя водой [1, 8, 10].

5. Методика оценки надежности и повышения сейсмостойкости систем водоотведения

Вопросы повышения надежности работы систем водоотведения, их способность воспринимать возрастающие нагрузки от хозяйственно-бытовых и ливневых сточных вод являются актуальными. Для оценки надежности работы систем водоотведения предложен новый количественный показатель – количество сточных вод за год, которое попадает без очистки на поверхность земли в результате аварийных ситуаций. На основе статистических данных по интенсивностям отказов и методики моделирования напорно-безнапорных режимов движения сточных вод в безнапорных системах водоотведения разработана методика вычисления таких расходов. Для повышения надежности систем водоотведения разработаны методические указания и методы формирования кольцевых структур систем водоотведения, включая разгрузочные коллектора и коллектора переброски стоков. Для кольцевых систем водоотведения разработана новая методика гидравлического расчета, включая организацию работы шибберных устройств [4, 7, 11]. Эта методика и соответствующий ПВК используется в Водоканалах городов Иркутской области для оценки возможных ливней и переполнения системы водоотведения. Такие задачи ранее не имели решения.

6. Компьютерные технологии оценки пропускной способности, обнаружения и локализации засоров в безнапорных коллекторах систем канализации

Как показали проведенные исследования, образовавшийся засор в системе водоотведения может приводить к наполнению любого коллектора и выходу стоков на поверхность земли совершенно в далеком от засора колодце. Поэтому возникает задача по месту появления стоков на поверхности в наблюдаемом колодце определить место образовавшегося засора. Для реализации этой задачи

разработана методика расчета напорно-безнапорных режимов на все возможные случаи появления засоров. Расчеты выполняются заранее и формируются как заготовки в системе диспетчерского управления. При выходе стоков на поверхность земли в каком-либо из колодцев, компьютерная система распознает и выдает диспетчеру колодцы и участок сети, в которых произошел засор. Диспетчер дает команду аварийной бригаде выехать на ликвидацию засора в то место, где он произошёл. При этом время на поиск места засора практически не затрачивается, а время его ликвидации сокращается в разы.

Как показали проведенные исследования, в первую очередь переполняются колодцы в пониженных точках рельефа местности. Поверхностные стоки, попадая в колодцы на возвышенностях отметках, перемещаются по коллекторам (возможно даже в обратном направлении к уклону трубопровода) и выливаются из колодцев в пониженных отметках. При этом система водоотведения перестает работать как единая и ее пропускная способность уменьшается до минимальной. С целью предотвращения такого явления предлагается в колодцах с пониженными отметками поверхности земли устраивать блокирующие сооружения, типа «обратного клапана». Такие конструкции позволяют на некоторых участках сети перевести движение стоков в напорный режим и тем самым значительно увеличить пропускную способность системы и нормализовать работу всей системы водоотведения. Реализация такого подхода позволяет избежать выхода стоков на поверхность земли и затопления территории, и является мало затратным мероприятием [12–14].

7. Методические основы повышения управляемости систем водоотведения за счет перехода на кольцевые структуры и установки шибберных устройств

В ходе развития городской территории и уплотнения жилищного строительства в системах водоотведения наблюдаются такие режимы, когда одни коллектора становятся перегруженными, другие недогруженными. Поэтому возникает задача управления потоками сточной жидкости с целью равномерного их распределения и движения по всей системе водоотведения, с допустимыми не заливающими скоростями. Для оптимального управления потоками сточной жидкости (по критерию минимальных затрат электроэнергии) разработана методика, основанная на методе поиска максимального потока минимальной стоимости. При этом для каждого ча-

са формируются графики включения, или отключения насосов, открытия и закрытия шибберных устройств [4, 12, 15]. Такая система управления реализована на коллекторах водоотведения г. Ангарска Иркутской области и показала значительную экономическую эффективность. Предлагаемая методика позволяет не только оптимально управлять потоками сточной жидкости, но и формировать оптимальные структуры сооружений для управления: места установки и параметры насосных станций перекачки стоков, количество и места установки шибберных устройств. Эта методика использовалась при разработке перспективной схемы водоотведения г. Ангарска.

8. Методика обоснования параметров транспортирующих сооружений и регулирующих емкостей на основе многорежимного характера движения сточной жидкости

Отличительной особенностью безнапорных систем водоотведения является то, что изменение расхода транспортируемых сточных вод происходит со скоростью их движения (0,7–3 м/с). В напорных системах изменение расхода происходит со скоростью звука в воде. В напорно-безнапорных системах изменение расхода представляет сложный процесс трансформации и требует специальных вычислений. Учитывая многорежимный характер поступления сточных вод в систему водоотведения, разработана методика формирования режимов их движения по коллекторам и сооружениям. Разработана кинематическая модель движения сточных вод в напорно-безнапорном режиме [4, 16, 17]. Эта модель позволяет учитывать регулирующие резервуары, которые могут быть при канализационных насосных станциях и в отдельных районах водоотведения.

9. Развитие теоретических и методических основ оптимального проектирования и реконструкции систем водоснабжения и водоотведения

С учетом законодательных основ и градостроительной деятельности, предлагается новая методика управления реконструкцией и развитием СВВ, которая воплощает принципы многоэтапности, адаптивности, и принятия решения с минимальной заблаговременностью. Сущность данной методики заключается в том, что проектируемая система и ее избыточная схема разбиваются на очередности ввода в эксплуатацию. Для первой очереди формируются всевозможные варианты строительства с учетом последующих очередей. Оценивается и выбирается лучший вариант. Осуществляется строительство. Уточняется

информация о параметрах второй очереди и все процедуры ее обоснования повторяются и т.д.¹ [4, 18]. Этот подход не противоречит сложившейся технологии реализации СВВ и дополняет ее моделями и методами, основанными на цифровизации всего жизненного цикла развивающихся СВВ.

10. Эффективность оценки стоимости жизненного цикла вариантов развития СВВ.

Как показали проведенные исследования эксплуатационные затраты в системы водоснабжения и водоотведения в 30-50 раз превышают единовременные капиталовложения. Поэтому любой вариант развития системы и организацию ее эксплуатации надо оценивать через критерий затрат жизненного цикла. Этот критерий утвержден на законодательном уровне и является основой для обоснования проектных решений. Используя гидравлические соотношения и укрупненные цены на проектирования и строительство систем водоснабжения и водоотведения, получены зависимости затрат жизненного цикла как функции объемов транспортируемой воды и сточной жидкости. Исследования данных зависимостей позволило получить новые экономически обоснованные значения скоростей движения воды и сточной жидкостей. Доказано, что оптимальные скорости не зависят от протяженности трассы, а зависят от расхода транспортируемой воды и стоков и от стоимости электроэнергии района строительства [19]. Использование значений оптимальных скоростей обеспечивает наименьшие эксплуатационные расходы за период жизненного цикла системы водоснабжения и водоотведения. Рекомендовано полученные зависимости включить в соответствующие СП.

11. Обоснование области применения автомобильного транспорта в районных системах водоснабжения и водоотведения

Ассенизационные машины уже давно используются в сельской местности, в садоводствах и коттеджных поселках для вывоза сточных вод из выгребных ям и септиков на централизованные очистные сооружения. Для небольших населенных мест, где нет качественных источников водоснабжения, чистая вода привозится из других населенных мест, либо от водопроводных очистных сооружений или непосредственно от источников качественной воды. Альтернативным вариантом является строительство трубопроводных СВВ. Однако, как показала история строительства групповых трубопроводов, они оказались ка-

питалоемкими и затратными и уже отслужили свой срок и требуют восстановления на новые. На выполнения этих работ так же требуются значительные капитальные затраты. Возникает проблема консервации и вывода из строя неэффективных в эксплуатации участков и сооружений, либо замена их на автомобильный транспорт. Однако технико-экономическое обоснование применения автомобильного транспорта по дальности и объемам перевозимых воды и стоков никто не проводил. Такая работа была выполнена [20] и на основании совместных функций СЖЦ по трубопроводным и автомобильным участкам транспорта сточных вод определены области применения автомобильного транспорта в зависимости от дальности и объемов перевозимых стоков, от стоимости электроэнергии и сейсмичности районов строительства. Разработаны методика формирования проектных схем и новые методы оптимизации районных систем водоотведения на основе минимизации СЖЦ. Методы позволяют в комплексе обосновать структуру сооружений и трассу из трубопроводных и автомобильных участков РСВ. Разработанная методика позволяет обосновывать структуры районных систем водоотведения при их поэтапном развитии и консервации.

12. Развитие методики схемно-структурной оптимизации для выбора трассы трубопроводов, обоснования мест водозаборов, водопроводных очистных сооружений

Предлагается методика схемно-структурной оптимизации для выбора трассы трубопроводов, обоснования мест водозаборов, водопроводных очистных сооружений на основе избыточных схем, которые формируются путем наложения альтернативных вариантов развития систем водоснабжения и водоотведения. При этом задача будет состоять в отбраковке неэффективных связей и узлов. Для этого реализованы и исследованы два метода [21]:

– первый основан на преобразовании избыточного графа в транспортную сеть с одной вершиной входа и одной вершиной выхода потоков и решении на ней задачи линейного программирования по схеме потоковых моделей;

– второй основан на поиске в избыточном графе структуры в виде дерева, соответствующего минимуму затрат жизненного цикла (метод по координатной, относительно контур-

¹Чупин В.Р. Оптимизация развивающихся систем подачи и распределения воды: автореф. дисс. д-ра техн. наук. М.: ВНИИВОДГЕО, 1991. 41 с.

ных переменных, минимизации).

Первый метод позволяет оптимизировать развивающиеся системы водоснабжения и водоотведения с учетом обоснования участков автомобильного транспорта, а также на основе автомобильного транспорта производить их консервацию. Второй метод эффективен для оптимизации новых сетей и сооружений систем водоснабжения и водоотведения древовидной структуры. Проведенные расчеты районных систем водоснабжения и водоотведения показали, что применение автомобильного транспорта существенно меняет трассы и структуру сооружений систем водоснабжения и водоотведения и делает их экономичнее по сравнению с трубопроводным транспортом на 30–50% (а это экономия сотен млн. руб. по каждому объекту).

13. Развитие методики схемно-параметрической оптимизации для обоснования диаметров трубопроводов, параметров насосных станций, объемов регулирующих емкостей

Схемно-параметрическая оптимизация относится к классу задач целочисленного программирования, когда из стандартного набора диаметров трубопроводов, типоразмеров насосного оборудования, водопроводных и канализационных типовых сооружений требуется выбрать лучшее, например, по критерию СЖЦ. Для решения этой задачи реализован и адаптирован к трубопроводным системам метод динамического программирования [19]. Этот метод приспособлен для оптимизации новых и реконструируемых СВВ разветвленной и кольцевой структуры, для напорных и самотечных участков сети.

14. Разработка методики многоступенчатой оптимизации для обоснования параметров многоуровневых систем транспорта и распределения воды, сбора и отведения сточных вод.

Современные системы водоснабжения и водоотведения это сложные, многоуровневые и распределенные на местности сооружения. При этом выделяются внутриквартальные системы, уличные сети, магистральные трубопроводы, межрайонные, районные и групповые системы, коллектора и трубопроводы глубокого заложения. Очевидным является рассмотрение и проектирование их как единых систем. Для таких объектов предложен метод многоступенчатой оптимизации объединяющий методы схемно-структурной и схемно-параметрической оптимизации СВВ [22].

15. Новый подход к управлению развитием систем водоснабжения и водоотведения в

условиях неопределенности перспективного потребления воды.

Новый подход основан на принципах постоянного, непрерывного и адаптивного управления развитием систем водоснабжения и водоотведения. При этом реализация проекта осуществляется поэтапно. В начале производится обоснование параметров первого этапа с учетом всех возможных сценариев развития последующих этапов. Для этого исследуются возможные интервалы водопотребления и рассчитываются стоимостные показатели различных вариантов развития. Используя нечеткое представление потребления воды, строится матрица стоимостных рисков. Далее, на основе методов теории принятия решения выбирается предпочтительный вариант и осуществляется строительство первого этапа. По мере реализации происходит снятие неопределенности в водопотреблении и, с учетом достигнутых показателей первого этапа, производится (по аналогии с первым этапом) обоснование параметров системы для второго этапа и т.д. [23]. Методика была применена в проектах развития систем водоснабжения и водоотведения населенных мест Иркутского района.

16. Методика формирования и оценки вариантов развития СВВ в условиях ограниченного финансирования

На современном этапе организации эксплуатации и развития СВВ финансирование всех мероприятий происходит за счет жителей и промышленных предприятий, для которых устанавливаются основные тарифы и плата за подключения для вновь вводимых в строй абонентов. По этой причине инвестиций хватает только на решение текущих проблем и задач, а на решения долгосрочных и стратегических проблем, их практически нет, или их недостаточно. Поэтому возникает задача оптимального распределения ограниченных инвестиций в строительство новых и реконструкцию существующих СВВ. Для этих целей предлагается подход, основанный на динамическом программировании и многошаговом процессе анализа различных вариантов строительства и реконструкции исходя из заданных объемов финансирования [24]. После наращивания всех возможных траекторий развития выбирается лучшая из них и обратным ходом восстанавливается траектория и соответствующие параметры строительства новых и реконструкции существующих элементов системы по этапам ее строительства. Методика была применена при обосновании параметров групповых

водопроводов Черемховского, Заларинского и Куйтунского районов Иркутской области.

17. Оптимизация СБВ с учетом уменьшающегося удельного водопотребления и численности населения

За 20 последних лет XXI в. удельное водопотребление в жилищном секторе уменьшилось почти в 2 раза. СБВ стали работать в нерациональных режимах с заиливающими скоростями и с образованием застойных зон в трубопроводных системах водоснабжения. Очевидно, требуется перекладка трубопроводов на меньшие диаметры, либо вывод из строя определенных участков СБВ, которые повышают производительность других, или увеличивают скорость движения воды и стоков до нормативных значений. Для решения этой задачи предлагается потоковая модель, которая на схеме существующих трубопроводов определяет такие участки и сооружения, которые максимизируют скоростной режим воды и сточных вод и минимизирует все эксплуатационные затраты [25]. Участки и сооружения, по которым поток не будет обозначен, требуется вывести из эксплуатации. Для районных систем водоотведения и для групповых водопроводов может быть не найдено решение (по всем участкам скорости движения воды могут быть меньше нормативных значений), потребуются их перекладка на меньшие диаметры, либо организация транспортирования автомобильным транспортом. Аналогичные проблемы возникают и при развитии СБВ, когда требуется при обосновании параметров первой очереди учесть нагрузки, которые появятся через десятки лет. Поэтому некоторое время возможна работа трубопроводов в нерациональных скоростных режимах. Как показали численные эксперименты, на этот период экономически выгодно использование автомобильного транспорта.

18. Развитие информационных технологий в области проектирования, эксплуатации и консервации СБВ

Вышеперечисленные подходы и методы реализованы в программном комплексе TRACE-VK², который показал значительную экономическую и вычислительную эффективность. В настоящее время данный программный продукт развивается и адаптируется к решению новых задач. Подобные вычислительные комплексы развиваются и за рубе-

жом, и у нас в стране. Однако все они имеют разную методическую основу, степень детализации и абстракции. На законодательном уровне не обозначены требования к программным продуктам и к внутреннему их содержанию. Очевидно происходит количественное накопление цифровых и информационных технологий в области СБВ.

Направления дальнейших научных исследований в области цифровизации СБВ связаны с решением проблем повышения надежности и управляемости СБВ на основе:

1. Использования аккумулирующих емкостей безнапорных коллекторов и канализационных колодцев.

2. Устройства блокирующих устройств в колодцах, предотвращающих выход стоков на поверхность земли.

3. Устройства резервных напорных и безнапорных трубопроводов.

4. Устройства разгрузочных коллекторов постоянного и временного действия.

5. Перехода на кольцевые структуры из напорных и безнапорных трубопроводов.

6. Устройства аварийно-регулирующих резервуаров.

7. С поиском и построением рациональных и оптимальных СБВ, сооружаемых в особо охраняемых территориях (на примере центральной экологической зоны оз. Байкал).

8. С разработкой эффективных подходов к управлению функционированием и развитием СБВ в условиях неопределенности технических, экономических и социальных параметров и факторов.

ВЫВОДЫ

Таким образом, сформулировано новое направление в области цифровых технологий организации строительной и жилищно-коммунальной сферы, а именно, разработка теории и практики моделирования и оптимизации систем водоснабжения и водоотведения. В этом направлении получены определенные результаты, которые обобщены и внедрены в процесс проектирования, эксплуатации и консервации городских инженерных систем.

Однако предстоит еще значительная работа и исследования на пути создания интеллектуальных систем жизнеобеспечения, основанных на полной их цифровизации, автоматизации и оптимизации.

²Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ №2021616739 от 26 апреля 2021 г. / Чупин Р.В., Мороз М.В., Мелехов Е.С.;

Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ №2016615463 TRACE-VK от 25 мая 2016 г. / Мелехов Е.С., Чупин В.Р., Чупин Р.В.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чупин Р.В., Мелехов Е.С. Развитие теории и практики моделирования и оптимизации систем водоснабжения и водоотведения. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного технического университета, 2011. 323 с. EDN: TOGMNF.
2. Чупин В.Р., Малевская М.Б. Выработка рекомендаций по минимизации последствий от аварийных ситуаций в системах водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. 1994. № 4. С. 8–9.
3. Chupin R.V., Pham N.M., Chupin V.R. Pressure-flow and Free-flow Discharge Modes in Closed-Loop Sewage Systems // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 262. P. 012079. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012079>.
4. Чупин Р.В. Оптимизация развивающихся систем водоотведения. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного технического университета, 2015. 417 с. EDN: UOATQZ.
5. Чупин В.Р., Мелехов Е. С., Чупин Р.В. Развитие методики гидравлических расчетов систем водоотведения // Вода и экология: проблемы и решения. 2010. № 1. С. 3–11.
6. Chupin R.V., Mayzel I.V., Chupin V.R. Trajectory of Sewerage System Development Optimization // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 2017. Vol. 262. P. 012080. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012080>.
7. Чупин Р.В. Напорное – безнапорное движение стоков в системах водоотведения кольцевой структуры // MOTROL. 2014. Vol. 16. No. 5. P. 3–15.
8. Чупин Р.В., Бобер А.А. Повышение надежности проектируемых и реконструируемых систем водоотведения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 9 (68). С. 113–119. EDN: PDCFZT.
9. Chupin R.V., Pham N.M., Chupin V.R. Optimization of development schemes for group water supply systems under uncertainty of prospective water consumption // E3S Web of Conferences: Mathematical Models and Methods of the Analysis and Optimal Synthesis of the Developing Pipeline and Hydraulic Systems. 2019. Vol. 102. P. 03004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910203004>. EDN: VWEGVS.
10. Chupin R.V., Pham N.M., Chupin V.R. Optimal reconstruction of water supply network under conditions of reduced water consumption // E3S Web of Conferences: Mathematical Models and Methods of the Analysis and Optimal Synthesis of the Developing Pipeline and Hydraulic Systems. 2019. Vol. 102. P. 03005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910203005>. EDN: ZVVD0U.
11. Chupin R.V., Pham N.M., Chupin V.R. Optimization of the sewerage systems scheme of cities and populated areas // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 667. P. 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/667/1/012018>. EDN: RVXXLA.
12. Чупин Р.В., Мелехов Е.С. Повышение пропускной способности системы водоотведения поверхностного водостока // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2010. № 9. С. 42–48.
13. Чупин Р.В., Шишелова Т.И., Бобер А.А. Напорное – безнапорное движение стоков в системах водоотведения кольцевой структуры // Фундаментальные исследования. 2012. № 11-6. С. 1480–1486.
14. Chupin R.V. Comprehensive optimization of water supply and sanitation // Science and Engineering. 2020. Vol. 880. P. 012050. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/880/1/012050>.
15. Chupin R.V., Melekhov E.S. Justification of the parameters of developing water supply and sanitation systems based on their electronic models // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 880. P. 012050. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/880/1/012050>.
16. Чупин Р.В., Мелехов Е.С. Развитие методики гидравлических расчетов систем дождевой канализации // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2010. № 4. С. 32–36.
17. Pupyrev E.I., Chupin R.V., Gogina E.S., Makisha N.A., Nechaev I.A., Pukemo M.M. Elaboration of a Regional Concept for Developing a Water Disposal System for the Central Ecological Zone of the Baikal Natural Territory // Water Resources. 2020. Vol. 47. No. 4. P. 663–671. <https://doi.org/10.1134/S0097807820040144>.
18. Nguyen T.A., Nguyen T.N.H., Chupin R.V. Phương pháp tối ưu hóa thiết kế, sửa chữa và nâng cấp hệ thống thoát nước // Tạp chí khoa học công nghệ xây dựng. 2017. No. 32 (01). P. 68–74.
19. Чупин Р.В., Мороз М.В., Бобер В.А. Обоснование диаметров трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения на основе минимизации затрат их жизненного цикла // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 4. С. 52–58. <https://doi.org/10.35776/VST.2022.04.07>. EDN: CIOYJH.
20. Чупин Р.В., Мороз М.В. Применение автомобильного транспорта в системах группового водоснабжения и водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. 2021. № 5. С. 57–64. <https://doi.org/10.35776/VST.2021.05.07>. EDN: RDVUAL.
21. Мороз М.В., Витязева М.М. Оценка возможности применения расчета тепловой мощности системы отопления с помощью программного комплекса Autodesk Revit // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 1 (40). С. 82–89. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-1-82-89>. EDN: PSGGNG.
22. Мелехов Е.С., Майзель И.В., Чупин Р.В., Опти-

мизация многоуровневых систем водоснабжения и водоотведения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 9 (56). С. 90–100. EDN: OEEVZB.

23. Чупин Р.В., Мороз М.В., Чупин В.Р. Проектирование систем водоснабжения и водоотведения в условиях нечетких значений перспективного водопотребления и численности населения // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 11. С. 16–25. <https://doi.org/10.35776/VST.2022.11.02>. EDN: XXZIEA.

24. Чупин В.Р., Мороз М.В. Метод поиска максимального потока минимальной стоимости в зада-

чах обоснования структуры и параметров систем группового водоснабжения и водоотведения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2020. № 11 (743). С. 63–74. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2020-743-11-63-74>. EDN: DTELVE.

25. Чупин Р.В., Примин О.Г. Обоснование параметров новых и реконструируемых систем водоотведения в условиях неопределенности перспективного потребления воды и сброса стоков // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 11. С. 36–45. EDN: ZRKPZR.

REFERENCES

1. Chupin R.V., Melekhov E.S. Development of theory and practice of modeling and optimization of water supply and sanitation systems. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2011. 323 p. (In Russ.). EDN: TOGMNF.

2. Chupin V.R., Malevskaya M.B. Development of recommendations to minimize the consequences of emergencies in water supply systems. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 1994;4:8-9. (In Russ.).

3. Chupin R.V., Pham N.M., Chupin V.R. Pressure-flow and Free-flow Discharge Modes in Closed-Loop Sewage Systems. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017;262:012079. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012079>.

4. Chupin R.V. Optimization of developing wastewater disposal systems. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2015. 417 p. (In Russ.). EDN: UOATQZ.

5. Chupin V.R., Melekhov E.S., Chupin R.V. The development of water disposal system hydraulic calculation technique. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya = Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2010;1:3-11. (In Russ.).

6. Chupin R.V., Mayzel I.V., Chupin V.R. Trajectory of Sewerage System Development Optimization. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017;262:012080. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012080>.

7. Chupin R.V. Pressure and without pressure motion of flows in sewage system with circular structure. *MOTROL*. 2014;16(5):3-15. (In Russ.).

8. Chupin R.V., Bober A.A. Increasing reliability of designed and reconstructed water disposal systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk state technical university*. 2012;9:111-119. (In Russ.). EDN: PDCFZT.

9. Chupin R.V., Pham N.M., Chupin V.R. Optimization of development schemes for group water supply systems under uncertainty of prospective water consumption. *E3S Web of Conferences: Mathematical Models and Methods of the Analysis and Optimal Synthesis of the Developing Pipeline and Hydraulic Systems*. 2019;102:03004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910203004>. EDN:

VWEGVS.

10. Chupin R.V., Pham N.M., Chupin V.R. Optimal reconstruction of water supply network under conditions of reduced water consumption. *E3S Web of Conferences: Mathematical Models and Methods of the Analysis and Optimal Synthesis of the Developing Pipeline and Hydraulic Systems*. 019;102:03005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910203005>. EDN: ZVVDUO.

11. Chupin R.V., Pham N.M., Chupin V.R. Optimization of the sewerage systems scheme of cities and populated areas. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019;667:012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/667/1/012018>. EDN: RVXXLA.

12. Chupin R.V., Melekhov E.S. Increasing the throughput capacity of the surface drainage system. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*. 2010;9:42-48. (In Russ.).

13. Chupin R.V., Shishelova T.I., Bober A.A. The pressure – non-pressure movement of drains in ring systems of water removal. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research*. 2012;11-6:1480-1486. (In Russ.).

14. Chupin R.V. Comprehensive optimization of water supply and sanitation. *Science and Engineering*. 2020;880:012050. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/880/1/012050>.

15. Chupin R.V., Melekhov E.S. Justification of the parameters of developing water supply and sanitation systems based on their electronic models. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;880:012050. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/880/1/012050>.

16. Chupin R.V., Melekhov E.S. Development of methods of hydraulic calculations of rainwater drainage systems. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*. 2010;4:32-36. (In Russ.).

17. Pupyrev E.I., Chupin R.V., Gogina E.S., Makisha N.A., Nechaev I.A., Pukemo M.M. Elaboration of a regional concept for developing a water disposal system for the central ecological zone of the Baikal natural territory. *Water Resources*. 2020;47(4):663-671. <https://doi.org/10.1134/S0097807820040144>.

18. Nguyen T.A., Nguyen T.N.H., Chupin R.V.

Phương pháp tối ưu hóa thiết kế, sửa chữa và nâng cấp hệ thống thoát nước. *Tạp chí khoa học công nghệ xây dựng*. 2017;32(01):68-74. (In Vietnam).

19. Chupin R.V., Moroz M.V., Bober V.A. Substantiation of the diameters of pipelines of water supply and wastewater disposal systems based on minimizing the costs of their life cycle. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 2022;4:52-58. (In Russ.).
<https://doi.org/10.35776/VST.2022.04.07>. EDN: CIOYJH.

20. Chupin R.V., Moroz M.V. The use of road transport in the systems of group water supply and wastewater disposal. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 2021;5:57-64. (In Russ.).
<https://doi.org/10.35776/VST.2021.05.07>. EDN: RDVUAL.

21. Moroz M.V., Vityazeva M.M. Assessment of the possibility of calculating the thermal performance of building heating systems using the Autodesk Revit software package. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2022;12(1):82-89. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-1-82-89>. EDN: PSGGNG.

22. Melekhov E.S., Maizel I.V., Chupin R.V. Optimization of multilevel systems of water supply and sewerage. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk state technical university*. 2011;9:90-100. EDN: OEEVZB.

23. Chupin R.V., Moroz M.V., Chupin V.R. Proektirovanie sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya v usloviyakh nechetkikh znachenii perspektivnogo vodopotrebleniya i chislennosti naseleniya. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 2022;11:16-25. (In Russ.).
<https://doi.org/10.35776/VST.2022.11.02>. EDN: XXZIEA.

24. Chupin V.R., Moroz M.V. Method for finding the maximum flow of the minimum cost in the problems of substantiating the structure and parameters of group water supply and sanitation systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo = News of higher educational institutions. Construction*. 2020;11:63-74. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2020-743-11-63-74>. EDN DTELVE.

25. Chupin R.V., Primin O.G. Substantiation of the wastewater disposal system parameters in the context of projected water consumption and wastewater discharge uncertainty. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 2017;11:36-43. (In Russ.). EDN: ZRKPZR.

Информация об авторе

Чупин Виктор Романович,

д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой городского
строительства и хозяйства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: chupinvr@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-5460-4780>

Information about the author

Victor R. Chupin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Urban
Construction and Economy,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: chupinvr@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-5460-4780>

Вклад автора

Автор провел исследование, подготовил рукопись к печати и несет ответственность за плагиат.

Contribution of the author

Author has conducted the study, prepared the manuscript for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.01.2023.
Одобрена после рецензирования 16.02.2023.
Принята к публикации 20.02.2023.

Information about the article

The article was submitted 18.01.2023.
Approved after reviewing 16.02.2023.
Accepted for publication 20.02.2023.



Оптимизация параметров микроклимата в спортивных каркасно-тентовых зданиях

И.Ю. Шелехов^{1✉}, М.И. Федотова², А.И. Шелехова³

^{1,2,3}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются меры по оптимизации энергетических затрат при обогреве каркасно-тентовых зданий, предназначенных для проведения спортивных мероприятий. Приводятся данные по имеющимся системам отопления тентовых зданий периодического использования, показано, что климатические условия для нахождения в данных помещениях спортсменов и зрителей в подавляющем большинстве не соответствуют существующим нормам. Наложение двух факторов, влияющих на параметры микроклимата, в виде периодичности использования и низкий коэффициент термического сопротивления ограждающих конструкций, требует применения новых методик не только в формировании режима работы климатического оборудования, но и в новых способах его контроля. В статье представлены результаты исследования параметров микроклимата в каркасно-тентовом сооружении, при использовании новых методов и подходов к системам управления климатическим оборудованием и к процессу формирования климатических условий в зависимости от типа одежды и вида выполняемых работ. Из представленных результатов видно, что внедрение новых алгоритмов управления и применение новых способов контроля параметров микроклимата позволяют экономить до 30% тепловой энергии, при обеспечении благоприятных параметров микроклимата по всему объему помещения, при этом помещение выходит на стационарный режим отопления более чем в два раза быстрее. Для развития физкультуры и спорта необходимо использовать конструкции, которые можно быстро смонтировать и ввести в эксплуатацию, для этих целей наилучшим вариантом являются каркасно-тентовые сооружения. Наложение (overlap) двух факторов, влияющих на параметры микроклимата, в виде частоты использования и низкого коэффициента теплового сопротивления ограждающих конструкций, требует применения новых методик не только при формировании режима работы климатического оборудования, но и новых методов его контроля. В статье представлены результаты исследования параметров микроклимата в каркасно-тентовой конструкции с использованием новых методов и подходов к системам управления климатическим оборудованием и к процессу формирования климатических условий.

Ключевые слова: параметры микроклимата, адаптивная система вентиляции, каркасно-тентовые здания, спортивные мероприятия, энергоэффективность

Для цитирования: Шелехов И.Ю., Федотова М.И., Шелехова А.И. Оптимизация параметров микроклимата в спортивных каркасно-тентовых зданиях // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 369–377. <https://elibrary.ru/hatvrn>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-369-377>.

Original article

Optimization of microclimate parameters in sports frame and tent facilities

Igor Yu. Shelekhov^{1✉}, Maria I. Fedotova², Anastasia I. Shelekhova³

^{1,2,3}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The paper considers measures to optimize energy costs in the heating of frame and tent facilities designed for sports events. Data on the available heating systems of temporarily used tent facilities are presented. It is shown that climatic conditions for athletes and the audience in these facilities do

not meet the existing standards in the vast majority of cases. The combination of two factors affecting the microclimate parameters, i.e., the usage frequency and the low thermal resistance coefficient of the enclosing structures, requires the application of new practices not only in the form of climate control equipment operation mode, but also in the form of new monitoring techniques. The paper presents the results of a study of microclimate parameters in a frame and tent facility when using new techniques and approaches to climate control systems and to the process of forming climatic conditions depending on the clothing and the type of work performed. The results show that the introduction of new control algorithms and the implementation of new ways of monitoring microclimate parameters can save up to 30% of thermal energy while providing favorable microclimate parameters throughout the entire room, with the room reaching steady-state heating mode more than twice as fast. For the development of physical education and sports, it is necessary to use structures that can be quickly assembled and put into operation. For these purposes, frame and tent facilities are the best option.

Keywords: microclimate parameters, adaptive ventilation system, frame-tent buildings, sports events, energy efficiency

For citation: Shelekhov I.Yu., Fedotova M.I., Shelekhova A.I. Optimization of microclimate parameters in sports frame and tent facilities. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(2):369-377. (In Russ.). <https://elibrary.ru/hatvrn>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-369-377>.

ВВЕДЕНИЕ

Для ведения полноценного образа жизни любой человек должен систематически заниматься физическими упражнениями. Для этого можно осуществлять прогулки на свежем воздухе и делать утреннюю зарядку. Чтобы быть физически готовым для защиты своей Родины, этого недостаточно: необходимо развивать спортивные секции и создавать для этого соответствующую структуру, а для развития командного духа надо проводить спортивные мероприятия. Спортивные мероприятия проводятся разного уровня и в различных видах спорта, и быстро создать инфраструктуру для этого сложно, дорого и, в ряде случаев, просто нецелесообразно [1]. В данной ситуации хорошо себя зарекомендовали временные строительные сооружения каркасно-тентового типа, которые можно построить и ввести в эксплуатацию без сложной процедуры согласования за относительно небольшой промежуток времени [2].

Используя современные технологии, каркасно-тентовое здание можно построить из легких металлоконструкций с внутренней инженерной структурой: отоплением, освещением и вентиляцией.

Новейшие производственные технологии позволяют не только заранее спроектировать и изготовить все элементы здания [3], но и смоделировать теплотехнические процессы, которые будут реализовываться в здании при эксплуатации [4].

В отличие от других строений, изготовить каркасно-тентовые сооружения можно специальной формы, в зависимости от вида спортив-

ных мероприятий или национальных традиций [5, 6]. Анализ научных статей по данной теме показал, что в зависимости от региона использования каркасно-тентовых спортивных сооружений возникают проблемы с обеспечением внутренних климатических условий [7–10].

При осуществлении мероприятий подразумевается, что в одном и том же здании находятся люди в легкой спортивной, рабочей и повседневной одежде. Если мероприятия проводятся в летний период времени, данное рассогласование в тепловых ощущениях возможно устранить управлением воздушными потоками в системе вентиляции; в другие периоды, особенно зимой, необходимо разрабатывать и внедрять эффективные системы аклиматизации [11].

Данной проблемой занимаются многие ученые, которые методом модулирования климатических параметров на физических моделях пришли к выводу, что в помещениях каркасно-тентового типа не целесообразно совмещать систему вентиляции с системой воздушного отопления, оптимизацию климатических параметров необходимо осуществлять путем управления воздушно-тепловыми потоками и внедрением автоматизированных систем управления, адаптированных непосредственно к условиям эксплуатации [12–15].

Наилучшие показатели по обеспечению параметров микроклимата в каркасно-тентовых сооружениях получаются при совмещении работы системы вентиляции с системами инфракрасного отопления с программированным управлением движениями воздушно-тепловых потоков [16–19].

МЕТОДЫ

Каркасно-тентовые здания, предназначенные для проведения спортивных мероприятий, относятся к зданиям больших объемов периодического использования, ограждающие конструкции которого имеют низкий коэффициент термического сопротивления. В связи с тем, что данные помещения предназначены для посещений большим количеством людей, часть этих людей непосредственно контактируют друг с другом, а часть подвергаются активной физической нагрузке, поэтому необходимо предусматривать мероприятия по обеззараживанию и воздухообмену, чтобы воздушная среда соответствовала гигиеническим требованиям¹. Специфика спортивных сооружений подразумевает, что имеются места для выполнения физических упражнений, места для спортивных игр, места для зрителей и отдыха [20], общие параметры микроклимата при этом рассчитываются по усредненным значениям, что приводит к избыточному теплоснабжению и не обеспечивает необходимого комфорта. Нормы воздухообмена в спортивных залах принимаются по укрупненным показателям, где определено, что кратность воздухообмена должна быть не менее 3-х с поступлением свежего воздуха не менее 40–60 м³ [21].

На большей территории России преобладают отрицательные температуры, поэтому свежий воздух надо нагреть до благоприятной температуры. Обычно данные помещения начинают прогревать в день проведения мероприятий, при этом ограждающие конструкции обладают повышенной теплоотдачей, и их температура зависит от множества внешних и внутренних факторов. Для оптимизации энергетических затрат помещения делят на зоны с различными климатическими условиями с обеспечением локализованного воздухообмена и используют программируемые устройства, управляющие воздушно-тепловыми потоками с учетом температуры ограждающих конструкций.

Обслуживаемые технологические зоны, где производятся работы, продолжительное время отгорожены от стен. Ворота в здании расположены с двух сторон, рядом с воротами, с правой стороны, расположены вентиляционные каналы для осуществления работы приточно-вытяжной вентиляции. Человек ощущает себя комфортно при определенном сочетании воздействия на него теплового из-

лучения от ограждающих конструкций и предметов, находящихся в помещении, а также от температуры воздуха в данном помещении. Каркасно-тентовые здания имеют холодные стены, и в здание, при открывании ворот, проникают большие массы холодного воздуха, поэтому необходимо управлять процессом обогрева рабочих мест с контролем температуры радиационных нагревателей и температуры нагревателей воздуха.

Цель нашего исследования – определить теплотехнические параметры инфракрасных нагревательных элементов в зависимости от температуры ограждающих конструкций, движения воздушных потоков и внутренней температуры помещения. Для этого в различных зонах каркасно-тентового помещения устанавливались:

- датчик температуры воздуха;
- датчик для измерения радиационной температуры;
- датчик температуры ограждающих конструкций;
- анемометр (testo 410–1).

Данные через интерфейс поступали на персональный компьютер, где они анализировались, и определялась величина напряжения, которая должна подаваться на инфракрасный нагреватель, чтобы скомпенсировать все факторы, воздействующие на человека и обеспечить его комфортное нахождение в данном помещении. Параметры комфортности определялись по методике профессора О. Фангера [22].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования проводились в каркасно-тентовом здании размерами 32 x 21 м², расположенном в Бодайбинском р-не Иркутской области. Отопление данного здания осуществляется электрическими калориферными установками, при этом в здании имеется приточно-вытяжная вентиляция с направленным воздушным потоком от одной стены к другой. В помещении ощущается постоянное движение воздушно-тепловых потоков. Прогрев помещения осуществляется за 3 часа до прихода обслуживающего персонала до усредненной температуры в помещении +17°C, при внешней температуре -25°C. Наличие постоянной вентиляции обусловлено стационарными воздушно-тепловыми потоками по всему объему помещения, которые приходят в дисбаланс при любых внешних воздействиях, таких, как открывание дверей и изменение вет-

¹СанПиН 2.4.2.2821-10 Санитарно-эпидемиологические требования к условиям и организации обучения в общеобразовательных учреждениях // Гарант.ру [Электронный ресурс]. URL: <https://rg.ru/documents/2011/03/16/sanpin-dok.html> (12.10.2022)

ровой нагрузки на здание. Общей чертой каркасно-тентовых зданий является отсутствие массивных конструкций с большой теплоемкостью, что влияет на внутреннее колебание температурных параметров при изменении внешних метеорологических условий.

Условно разбив помещение пополам, мы измерили параметры температуры, которые создаются при штатной системе отопления. График температурных параметров на высоте 1,5 м представлен на рис.1.

Из представленного графика видно, что имеется большой градиент температуры по площади помещения, несмотря на то, что ско-

рость воздушных потоков в зоне измерения составляет величину 0,4–0,8 м, процесса смешивания не происходит. Измерение на высоте 2,5 м показало, что имеются локальные зоны с температурой +23–28 °С, при этом непосредственно в зоне ограждающих конструкций температура воздуха находится в пределах +10–12 °С. Для оптимизации температурных параметров в помещении были установлены инфракрасные нагревательные приборы (рис. 2) и программируемый щит управления технологическими параметрами, созданный на основе программируемых логических устройств.

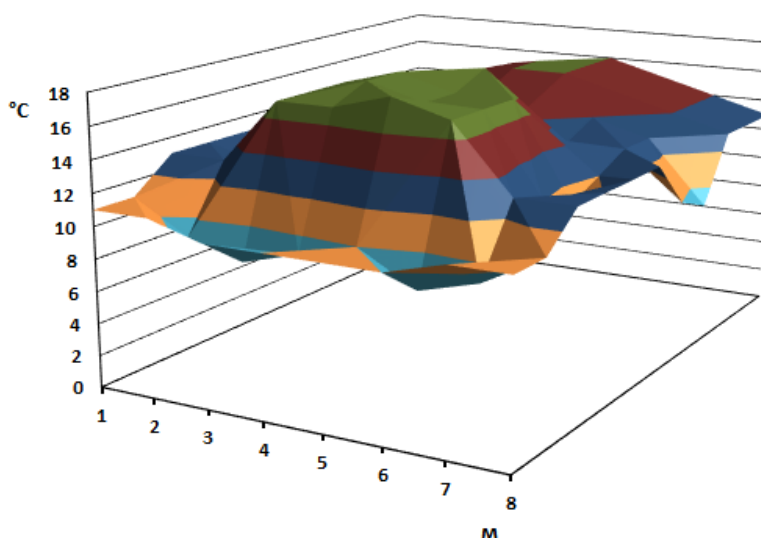


Рис. 1. График температурных параметров при воздушной системе отопления в каркасно-тентовом здании

Fig. 1. Graph of temperature parameters for an air heating system in a frame-tent building



Рис. 2. Система отопления каркасно-тентового здания

Fig. 2. Heating system of a frame-tent building

В задачу щита управления входит управление кратностью воздухообмена в зависимости от количества людей, находящихся в помещении, и изменение мощности инфракрасных нагревательных приборов в зависимости от температуры ограждающих конструкций. Мощность калориферных установок была понижена пропорционально мощности устанавливаемых инфракрасных нагревательных приборов. При изменении способа обогрева каркасно-тентового здания время выхода на стационарный режим уменьшилось на 1 ч (рис. 3).

С изменением типа обогрева помещения снизилось движение воздушно-тепловых потоков, уменьшились теплопотери через ограждающие конструкции и, как результат, время нагрева помещения снизилось с 3 ч до 2 ч. На рис. 4 представлен график темпера-

турных параметров при изменении типа обогрева.

Из представленного графика видно, что новая система отопления создает равномерные температурные параметры по объему помещения, включая область рядом с ограждающими конструкциями. В стационарном режиме потребляемая мощность новой системы отопления была меньше штатной на 27% при значительно меньших энергетических затратах, параметры микроклимата находятся в нормированном значении, чего не удавалось получить при штатной системе отопления.

Несмотря на то, что температурные параметры соответствуют нормированным значениям, видно, что еще присутствует неравномерность нагрева, которую можно избежать путем применения других типов инфракрасных нагревателей.

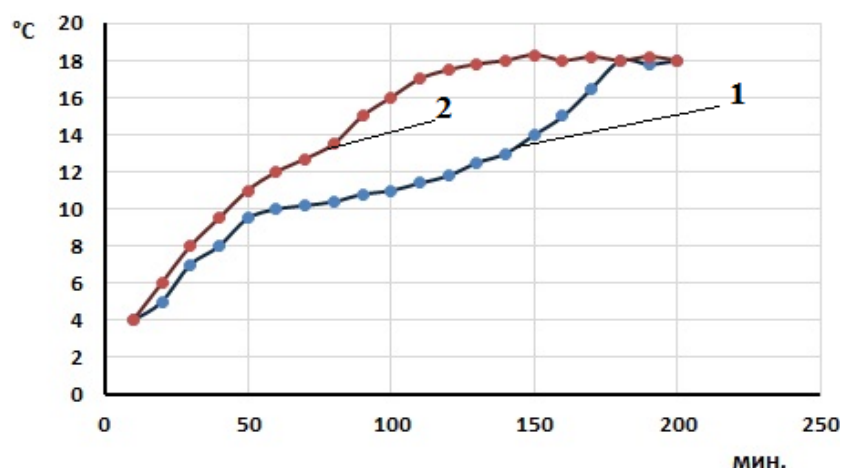


Рис. 3. Время нагрева помещения: 1 – воздушная система отопления; 2 – совмещенная система отопления (воздушная + инфракрасная)

Fig. 3. Heating time of the room: 1 – air heating system; 2 – combined heating system (air + infrared)

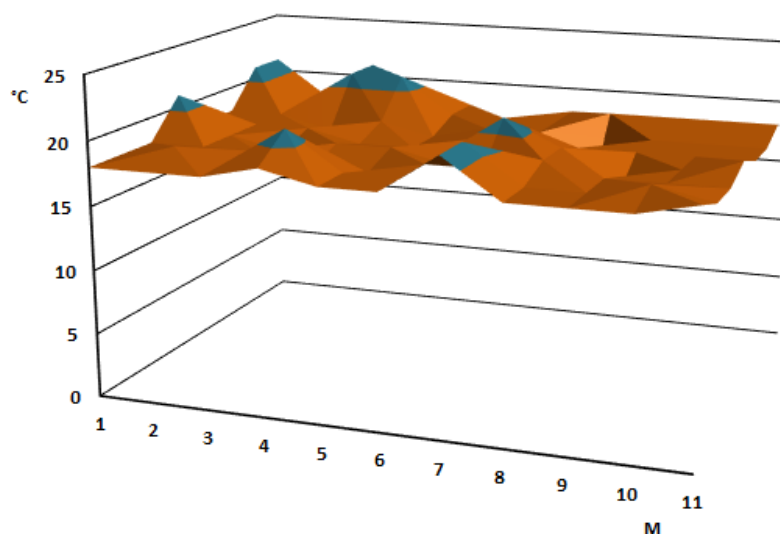


Рис. 4. График температурных параметров при совмещенной системе отопления

Fig. 4. Graph of temperature parameters for combined heating system

Представленные результаты натурных исследований показали, что мероприятия по оптимизации параметров микроклимата в каркасно-тентовом здании привели к положительным результатам.

ВЫВОДЫ

В результате проделанной работы были разработаны и внедрены мероприятия по улучшению параметров микроклимата в каркасно-тентовом здании, при этом были снижены энергетические затраты, уменьшено время прогрева здания и улучшены параметры микроклимата.

Применение новых методов диагностики и современное программное обеспечение по-

могают не только проводить анализ работы инженерных систем в зданиях различного назначения, но и разрабатывать мероприятия по улучшению их работы. Создавая алгоритмы совместного управления работой различных инженерных систем, представляется возможным не только обеспечить их экономичную и надежную работу, но и существенно улучшить общие потребительские параметры.

Результаты данной работы послужат дальнейшему внедрению различных комбинированных систем отопления, в том числе при строительстве и эксплуатации каркасно-тентовых зданий, предназначенных для проведения спортивных мероприятий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Левченко Г.Н., Зеткина А.В. Технологии быстровозводимых конструкции, их преимущества, виды и возможности применения при развитии спортивной инфраструктуры образовательных организаций министерства обороны российской федерации // Перспективы развития физической подготовки и спорта в вооруженных силах Российской Федерации в современных условиях: сб. науч. ст. Межвуз. науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 26–27 октября 2021 г.). В 4-х ч. Ч. 1. СПб.: Военный институт физической культуры, 2021. С. 61–66. EDN: OKDAKY.
2. Гусева Т.П. Инновационные технологии для жилищного строительства // Жилищное строительство. 2009. № 4. С. 4–6.
3. Зубарева Г.И., Мосунов Е.Э. Арочные каркасно-тентовые облегченные конструкции для быстровозводимых спортивных сооружений // Наука среди нас. 2019. № 8 (24). С. 50–54. EDN: HIMBGE.
4. Stanke D. Ventilation Where It's Needed // ASHRAE Journal. 1998. P. 39–47.
5. Тихонова Д.А., Мысцова О.В. Купольные тентовые конструкции: формообразование и дизайн // ДИСК-2017: Всерос. науч.-практ. конф. в рамках Всерос. форума молодых исследователей «Дизайн и искусство – стратегия проектной культуры XXI в.» (г. Москва, 20–24 ноября 2017 г.). Ч. 2. Москва: Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина, 2017. С. 126–128. EDN: XNMJZJ.
6. Идрисова Я.А., Кузнецова Е.П. Применение металлических конструкций в современных уникальных спортивных сооружениях // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2022. Т. 1. С. 32–37. EDN: ELOESQ.
7. Петросова Д.В. Фильтрация воздуха через ограждающие конструкции // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 2 (28). С. 24–31. EDN: OWKIPP.
8. Гошка Л.Л. К вопросу о необходимости внедрения эффективных систем климатизации зданий // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 7. С. 33–37. EDN: MZJCGP.
9. Алексеенко С. Энергосбережение-ключ к темпам роста национальной экономики // Наука в Сибири. 2004. № 48 (2484). С. 10–11.
10. Юрченко В. В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей в среде «SCAD Office // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 8 (18). С. 38–46. EDN: NBGCJN.
11. Саргсян С.В. Исследование способов организации воздухообмена и систем воздухораспределения на физических моделях в лабораторных условиях // Научное обозрение. 2015. № 16. С. 68–71. EDN: VWGIGB.
12. Шелехов И.Ю., Шишелова Т.И. Повышение эффективности приточных установок в системе вентиляции зданий // Фундаментальные исследования. 2011. № 8-3. С. 683–686. EDN: NYGXAX.
13. Захаров А.А., Низовцев М.И. Экспериментальные исследования регенератора тепла вентиляционного воздуха с изменяющимся направлением воздушного потока // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2014. № 1 (54). С. 143–150. EDN: SMYRHL.
14. Muravyova E.A. Development of intellectual complex for adaptive control of microclimate parameters of flour storage processes // Metrological support of innovative technologies – ICMSIT-2020: International scientific conference. IOP Conference Series: Metrological support of innovative technologies (г. Красноярск, 04 марта 2020 г.). Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 22006.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/2/022006>.
15. Shelekhov I.Yu. Electric microclimate system for frame structures // AIP Conference Proceedings (24 August 2022). 2022. Vol. 2434. No 1.

P. 030018. <https://doi.org/10.1063/5.0091841>.

16. Yu Yang, Baizhan Li, Hong Liu, Meilan Tan, Runming Yao. A study of adaptive thermal comfort in a wellcontrolled climate chamber // *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 76. № 5. P. 283–291. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.11.004>.
17. Gao P.X., Keshav S. SPOT: A Smart Personalized Office Thermal Control System // *e-Energy'13: Fourth International Conference on Future Energy Systems (ACM e-Energy)*, (Berkeley, 21–24 May 2013). P. 237–246.
18. Зайченко И.В., Соколова В.С., Гордин С.А., Бажеряну В.В. Параметрическая идентификация и математическое моделирование системы управления микроклиматом предприятия // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2020. № 3. С. 59–62. EDN: VEQPGM.
19. Бабинова А.С., Насыбуллина Г.М. Гигиеническая характеристика детско-юношеских спортивных школ // *Профилактическая медицина – 2018: сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием* (г. Санкт-Петербург, 29–30 ноября

2018 г.). СПб.: Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, 2018. С. 49–52. EDN: KGJPWS.

20. Нечипорук В.И., Абраменко Е.М., Ефремова Т.Г. Влияние микроклимата и санитарно-гигиенических условий на состояние здоровья школьников при занятиях физической культурой и спортом // *Олимпийская идея сегодня: всероссийская научная конференция* (г. Ростов-на-Дону, 11–13 апреля 2019 г.). Ростов-н/Д: Южный федеральный университет, 2019. С. 87–93. EDN: CXFKYY.
21. Гусейнова М.В., Махмудова В.Х., Шатохина С.А. О возможности использования среднеинтегрированной модели Фангера для контроля температурного комфорта в помещениях // *Актуальные проблемы экологии и охраны труда: сб. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф.* (г. Курск, 4 июня 2019 г.). Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 398–409. EDN: INKRYN.

REFERENCES

1. Levchenko G.N., Zetkina A.V. Technologies of prefabricated structures, their advantages, types and possibilities of application in the development of sports infrastructure of educational organizations of the Ministry of Defense of the Russian Federation. *Perspektivy razvitiya fizicheskoi podgotovki i sporta v vooruzhennykh silakh Rossiiskoi Federatsii v sovremennykh usloviyakh: sbornik nauchnykh statei Mezhevuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Prospects for the development of physical training and sports in the Armed Forces of the Russian Federation in modern conditions: collection of scientific articles of the Interuniversity scientific and practical conference*. 26-27 October 2021, Saint-Petersburg. In 4 parts. Part 1. Saint-Petersburg: Military Institute of Physical Culture; 2021. p. 61-66. (In Russ.). EDN: OKDAKY.
2. Guseva T.P. Innovative technologies for housing construction. *Zhilishchnoe stroitel'stvo = Housing construction*. 2009;4:4-6. (In Russ.).
3. Zubareva G.I., Mosunov E.E. Arched frame-awning lighted structures for fast-produced sports facilities. *Nauka sredi nas*. 2019;8:50-54. (In Russ.). EDN: HIMBGE.
4. Stanke D. Ventilation Where It's Needed. *ASHRAE Journal*. 1998:39-47.
5. Tikhonova D.A., Myskova O.V. Domed tent structures: shaping and design. *DISK-2017: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = DISK-2017: All-Russian scientific and practical conference within the framework of the All-Russian Forum of Young Researchers "Design and art - strategy of project culture of the XXI century"*. 20-24 November 2017, Moscow. Part 2. Moscow: Russian State University named after A.N. Kosygin; 2017. p. 126-128. (In Russ.). EDN: XNMJZJ.
6. Idrisova Ya.A., Kuznetsova E.P. Application of metal structures in modern unique sports facilities. Modern technologies in construction. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal = Magazine of civil engineering*. 2022;1:32-37. (In Russ.). EDN: ELOESQ.
7. Petrosova D.V. Filtration of air through building envelopes. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2012;28(2):24-31. (In Russ.). EDN: OWKIPP.
8. Goshka L.L. To the question of the need to introduce effective air conditioning systems in buildings. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2009;7:33-37. (In Russ.). EDN: MZJCGP.
9. Alekseenko S. Energy saving is the key to the growth rate of the national economy. *Nauka v Sibiri = Science in Siberia*. 2004;48(2484):1-13. (In Russ.).
10. Yurchenko V.V. Design of building frames from thin-walled cold-formed profiles in the SCAD Office environment. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2010;8(18):38-46. (In Russ.). EDN: NBGCJN.
11. Sargsyan S.V. Investigation of ways to organize air exchange and air distribution systems on physical models in laboratory conditions. *Nauchnoe obozrenie = Scientific review*. 2015;16:68-71. (In Russ.). EDN: VWGIGB.
12. Shelekhov I.Yu., Shishelova T.I. Improving the efficiency of air handling units in the ventilation system of buildings. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research*. 2011;8-3:683-686. (In Russ.). EDN: NYGXAX.
13. Zakharov A.A., Nizovtsev M.I. Experimental studies of ventilation air heat regenerator with changing airflow direction. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*. 2014;1(54):143-150.

(In Russ.). EDN: SMYRHL.

14. Muravyova E.A. Development of intellectual complex for adaptive control of microclimate parameters of flour storage processes. *Metrological support of innovative technologies – ICMSIT-2020: International scientific conference. IOP Conference Series: Metrological support of innovative technologies*. 04 March 2020, Krasnoyarsk). Institute of Physics and IOP Publishing Limited; 2020. P. 22006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/2/022006>.

15. Shelekhov I.Yu. Electric microclimate system for frame structures. *AIP Conference Proceedings*. 24 August 2022. 2022. Vol. 2434. No 1. P. 030018. <https://doi.org/10.1063/5.0091841>.

16. Yu Yang, Baizhan Li, Hong Liu, Meilan Tan, Runming Yao. A study of adaptive thermal comfort in a well-controlled climate chamber. *Applied Thermal Engineering*. 2015;76(5):283-291. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.11.004>

17. Gao P.X., Keshav S. SPOT: A Smart Personalized Office Thermal Control System. *e-Energy'13: Fourth International Conference on Future Energy Systems (ACM e-Energy)*, (Berkeley, 21–24 May 2013). P. 237–246.

18. Zaichenko I.V., Sokolova V.S., Gordin S.A., Bazheryanu V.V. Parametric identification and mathematical modeling of the enterprise microclimate control system. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya = Scientific and technical Volga region bulletin* 2020. No. 3. P. 59–62. EDN: VEQPGM.

19. Babikova A.S., Nasybullina G.M. Hygienic char-

acteristics of children's and youth sports schools. In: *Profilakticheskaya meditsina – 2018: sbornik nauchnykh trudov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem = Preventive Medicine – 2018: collection of scientific papers of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation*. 29-30 November 2018, Saint-Petersburg. Saint-Petersburg: North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov; 2018. p. 49-52. EDN: KGJPWS.

20. Nechiporuk V.I., Abramenko E.M., Efremova T.G. Influence of microclimate and sanitary and hygienic conditions schoolchildren state of health at working by physical culture and sports. In: *Olimpiiskaya ideya segodnya: vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya = The Olympic idea today: all-Russian scientific conference*. 11-13 April 2019, Rostov-on-Don. Rostov-on-Don: Southern Federal University; 2019. p. 87-93. EDN: CXFKYY.

21. Guseynova M.V., Makhmudova V.Kh., Shatkhina S.A. About the possibility of using a medium-integrated Fanger model to control indoor temperature comfort. In: *Aktual'nye problemy ekologii i okhrany truda: sbornik statei XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Actual problems of ecology and labor protection: collection of articles of the XI International scientific and practical conference*. 4 July 2019, Kursk. Kursk: The South-west State University; 2019. p. 398-409. EDN: INKRYN.

Информация об авторах

Шелехов Игорь Юрьевич,

к.т.н., доцент кафедры
городского строительства
и хозяйства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: promteplo@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7677-3187>

Федотова Мария Игоревна,

аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: fedotova_mariya1994@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9432-365X>

Шелехова Анастасия Игоревна,

студент,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: sheleh.ananas@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9045-9728>

Information about the authors

Igor Yu. Shelekhov,

Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor
of the Department of Urban Construction
and Economy,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: promteplo@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7677-3187>

Mariya I. Fedotova,

Graduate Student,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: fedotova_mariya1994@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9432-365X>

Anastasia I. Shelekhova,

Student,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: sheleh.ananas@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9045-9728>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 27.01.2023.
Одобрена после рецензирования 22.02.2023.
Принята к публикации 27.02.2023.

Information about the article

The article was submitted 27.01.2023.
Approved after reviewing 22.02.2023.
Accepted for publication 27.02.2023.

**Влияние структуры территориальной системы расселения
интерзонального типа на развитие Ангаро-Енисейского макрорегиона****Л.В. Глебушкина^{1✉}, Л.В. Перетолчина²**¹Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия²Братский государственный университет, г. Братск, Россия

Аннотация. В работе обсуждается Ангаро-Енисейский макрорегион, который образуют четыре субъекта РФ: Красноярский край, Иркутская область, Республики Хакасия и Тыва, расположенные в зоне Арктической широты, районах Крайнего Севера, местностях, приравненных к районам Крайнего Севера, Южной зоне, включающей основную полосу расселения людей. Являющийся предметом данного исследования макрорегион имеет интерзональную структуру систем населенных мест. Цель работы заключается в обосновании выбора в качестве объекта изучения всей территории макрорегиона и его систем расселения. Анализ Ангаро-Енисейского макрорегиона, основанный на принципе обеспечения целостности, указал на необходимость изучения как морфологических, так и функциональных структурных характеристик. В результате иерархической кластеризации было выявлено наличие трех типов системных зональных образований. Первый тип – агломерации, являющиеся наиболее динамичными элементами структуры территориальной системы расселения. Второй тип представлен градостроительными образованиями, ядрами которых являются города, претендующие на роль системных центров, формирующих опорный каркас расселения макрорегиона. Третий тип неоднороден, в него входят как моногорода, так и промышленные центры, стремительно теряющие население. Диапазон полученных количественных параметров критериев оценки позволяет использовать их при разработке разделов стратегий социально-экономического развития макрорегионов, а также для пространственного моделирования на базе каркасных, кластерных и функциональных моделей.

Ключевые слова: территориальная структура расселения, интерзональные системы расселения, агломерация, макрорегион, пространственное развитие

Для цитирования: Глебушкина Л.В., Перетолчина Л.В. Влияние структуры территориальной системы расселения интерзонального типа на развитие Ангаро-Енисейского макрорегиона // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 378–397. <https://elibrary.ru/gaoocw>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-378-397>.

Original article**Influence of the structure of an interzonal-type territorial settlement system on the development of the Angara-Yenisei macroregion****Lyudmila V. Glebushkina^{1✉}, Lyudmila V. Peretolchina²**¹Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia²Bratsk State University, Bratsk, Russia

Abstract. The study focuses on the Angara-Yenisei macroregion, which includes four constituent territories of the Russian Federation, i.e., Krasnoyarsk Krai, Irkutsk Oblast, the Republic of Khakassia, and the Republic of Tyva. These territories are located in the zone of the Arctic latitude; areas of the Far North; areas equated to the areas of the Far North; the Southern zone, which includes the main band of population settlement. The macroregion under study is characterized by an interzonal structure of human settlement. The aim was to justify the selection of the entire macroregion and its settlement systems as an object of study. An analysis of the Angara-Yenisei macroregion based on the principle of integrity identified the need to study both its morphological and functional structural characteristics. Hierarchical

© Глебушкина Л.В., Перетолчина Л.В., 2023

clustering revealed the presence of three types of systemic zonal formations. The first type is agglomerations, which are the most dynamic elements in the structure of the territorial settlement system. The second type is represented by urban formations with cities at their core, acting as system centers and forming a supporting framework of macroregion settlement. The third type is heterogeneous, including both single-industry towns and industrial centers that are rapidly losing their population. The obtained range of quantitative assessment parameters can be used when elaborating macroregional social and economic development strategies, as well as for spatial modeling based on framework, cluster, and functional models.

Keywords: territorial structure of settlement, interzonal settlement systems, agglomeration, macroregion, spatial development

For citation: Glebushkina L.V., Peretolchina L.V. Influence of the structure of an interzonal-type territorial settlement system on the development of the Angara-Yenisei macroregion. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'* = *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(2):378-397. (In Russ.). <https://elibrary.ru/gaoocw>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-378-397>.

ВВЕДЕНИЕ

Распоряжением правительства РФ от 13.02.2019 г. № 207-р была утверждена Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 г.¹. Следует согласиться с мнением о том, что: «В Стратегии предлагается использовать более эффективное укрупненное зонирование территории страны, связанное с формированием макрорегионов» [1, с. 70].

На территории Сибири выделено четыре макрорегиона, каждый из которых имеет интерзональную структуру региональных систем населенных мест (СНМ). Термин «...интерзональная (охватывающая несколько широтных природно-климатических зон) структура...» [2, с. 84] был предложен при разработке Генеральной схемы расселения на территории СССР. Известно, что «пространственное развитие стран зависит от особенностей географического положения, природных условий и демографических характеристик...» [3, с. 44].

Современное состояние демографических процессов в масштабе страны оценивается следующим образом: «В широтно-зональном направлении в России обозначились две неравные по размеру территории и концентрации населения, степени сформированности и уровню зрелости трансконтинентальные расселенческие структуры страны, – основная полоса расселения, концентрирующая большинство населения и населенных пунктов страны, и зона Севера с характерным для нее очаговым и дискретным заселением, которая пока не сформировалась как единая связная

трансконтинентальная расселенческая структура» [4, с. 863]. В результате рассмотрения информационно-аналитической базы по вопросам расселения как фактора регионализма невозможно не согласиться с выводами о том, что «... небольшое количество публикаций по вопросам пространственного развития, расселения и градостроительства на «макромасштабе» – в масштабах страны, отсутствие крупных практических работ по пространственному развитию России, подобных генсхемам расселения, привели к тому, что методология и методика комплексной оценки и прогнозирования на этом уровне за последние 30 лет существенно не продвинулись» [5, с. 95]. В стратегии пространственного развития одной из задач является «...повышение степени интегрированности (связности) и сбалансированности пространства на основе активизации и укрепления межрегиональных связей и снижения межрегиональной дифференциации, закрепления населения на геополитически значимых территориях» [1, с. 69]. Это значит, что существует потребность в разработке методик оценки состояния системы расселения макрорегиона как единого объекта исследования, механизмов пространственного планирования и прогнозирования через административные границы, вновь становится актуальным изучение влияния структуры территориальных систем интерзонального типа на развитие макрорегионов Сибири. В исследовании выдвинута гипотеза о том, что изменение структуры территориальной системы расселения даст импульс

¹Стратегия пространственного развития России на период до 2025 года // Судебные и нормативные акты РФ [Электронный ресурс]. URL: Режим доступа: <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-pravitelstva-rf-ot-13022019-n-207-r/strategiia-prostranstvennogo-razvitiia-rossiiskoi-federatsii/> (14.01.2023).

развитию макрорегиона.

Из четырех сибирских макрорегионов (Уральско-Сибирский, Южно-Сибирский, Ангара-Енисейский и Дальневосточный) в качестве объекта исследования для проверки гипотезы более всего подходит Ангара-Енисейский макрорегион (АЕМ), занимающий территории, расположенные от Северного Ледовитого океана до границы Российской Федерации с Монголией. В него входят четыре субъекта РФ: Красноярский край, Иркутская область, Республика Хакасия, Республика Тыва. На территории АЕМ расположены следующие широтные зоны: Арктическая зона РФ; районы Крайнего Севера; местности, приравненные к районам Крайнего Севера; Южная зона, включающая основную полосу расселения (ОПР).

Предметом исследования территориальной системы расселения макрорегиона является его структура. «В современном расселении, представляющем собой систему взаимосвязанных, активно взаимодействующих населенных мест, значимость входящих в систему поселений определяется не одним, а некоторой совокупностью аспектов цели и организации территориального социально-экономического комплекса. Это требует оценки городских и региональных структур на основе многомерного подхода, в котором социальный и экономический аспекты системообразования в сети населенных мест рассматривается одновременно, в неразрывной связи друг с другом» [6, с. 860]. Исследование проводилось в четыре этапа. На первом этапе была выполнена оценка социально-производственного потенциала сети городов АЕМ. «Полученное распределение значений C_i социально-производственного потенциала (табл. 1 и рис. 3) указало на наличие в макрорегионе четырех иерархических групп (рангов) поселений, имеющих различные предпосылки развития в системе расселения макрорегиона» [6, с. 863, табл. 1, с. 861, рис. 3, с. 863].

Для того чтобы понять, в чем заключаются особенности пространственного развития АЕМ, необходимо представить себе расселение как процесс. «Под расселением обычно понимают процесс распределения и перераспределения населения по территории и его результат – сеть поселений. С усилением связей между поселениями возникает сперва совокупность поселений, а затем сеть поселений. Взаимосвязанная и взаимообусловленная в своем развитии сеть поселений – это уже система поселений, или система расселения»². «Расселение населения как процесс может

быть количественно измерен. Советский географ О. А. Константинов предложил использовать минимум основных признаков: плотность населения (всего и только сельского), долю городского населения, людность городских поселений, людность сельских поселений, динамику населения (всего, городского и сельского)» [7, с. 43].

На втором этапе исследования была проведена оценка территориальной структуры расселения Ангара-Енисейского макрорегиона по указанным показателям, дополненным значениями средней густоты поселений на 10 000 км² и среднего расстояния до центра градостроительного образования.

Анализ показателей, полученных по 55-ти городам и связанными с ними поселениями показал высокую неоднородность сложившихся градостроительных образований. Поэтому на третьем этапе исследования путем проведения иерархического кластерного анализа была построена классификация рассматриваемых градостроительных образований, составляющих урбанизационную структуру разных территориальных уровней АЕМ. На четвертом этапе исследования ставилась задача выявить различия в степени урбанизованности всех четырех широтных зон, расположенных на обширной территории АЕМ. Это стало основанием для моделирования перспективной структуры расселения на всей территории макрорегиона как единого объекта территориального планирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При исследовании территориальных систем расселения в первую очередь изучается их структура. Структура системы раскрывается с отдельных ее сторон с помощью структурных характеристик. В исследовании территориальная структура понимается как «...соотношение территориальных подсистем системы расселения друг к другу и системе расселения в целом» [8, с. 8]. Это соотношение может быть выражено в следующих показателях: численность поселений; численность населения в них; плотность поселений на 1000 км²; площадь территории градостроительных образований, км²; радиус зоны влияния города, км; среднее расстояние между населенными пунктами, км; коэффициент агломеративности; коэффициент формы планировочной структуры расселения и социально-производственный потенциал городов Ангара-Енисейского региона.

Определение границ градостроительных образований проводилось с помощью

²Гладкий Ю.Н., Чистобаев А.И. Регионоведение: учебник. М.: Гардарики, 2002. 384 с.

графоаналитических методов, сегодня уже достаточно широко применяемых в градостроительных исследованиях. При расчете коэффициента формы населенные пункты и дороги, их соединяющие, были заменены их абстрактными геометрическими эквивалентами в виде вершин и ребер графа минимальной связности на основе кратчайших расстояний.

Коэффициент формы расселения и коэффициент агломеративности определялись по следующим формулам:

$$K_{\phi} = \frac{c}{d}, \quad (1)$$

где c – число всех ребер графа; d – максимальный диаметр графа;

$$U = \frac{N}{L}; L = \sqrt{\frac{S}{n}}, \quad (2)$$

где N – плотность поселений на территории градостроительных образований на 1000 км²; L – среднее расстояние между населенными пунктами; S – площадь территории градостроительного образования; n – количество поселений на территории градостроительного образования.

Такой отбор структурных характеристик территориальной системы расселения АЕМ позволил установить закономерности распределения градостроительных образований по широтным зонам и на этой основе спрогнозировать влияние градостроительных аспектов на процессы интеграции.

Выявление различий в характере расселения в разрезе широтных зон достаточно сложная задача, так как их урбанизационная структура несет на себе печать демографических процессов последних лет, историю освоения территорий и особенности местных условий. Поставленная цель была достигнута путем построения классификации градостроительных образований. Цель и форма классификации неразрывно связаны друг с другом. Методологической базой для выбора релевантных признаков классификации явились теоретические положения отечественной теории расселения. Существенными признаками, исходя из поставленной цели, были определены: средняя плотность всего населения и сельского в отдельности чел/км²; степень контрастности заселения; социально-производственный потенциал центра; коэффициент агломеративности; коэффициент формы.

Правила идентификации сходства и отношения элементов в группы могут быть более строго сформулированы с помощью

математических методов. Количественные методы классификации связаны с отысканием матрицы мер, заданных в определенной шкале, позволяющей выполнить надлежащую группировку. Для проведения иерархической кластеризации градостроительных образований по обозначенным признакам был выбран способ минимизации внутригрупповой дисперсии мер и максимизации групповой дисперсии. Сходство или различие между объектами классификации устанавливается в зависимости от выбранного метрического расстояния между ними. В данном случае был выбран «квадрат евклидова расстояния»³. Эта мера расстояния используется в тех случаях, когда требуется придать большее значение более отдаленным друг от друга объектам. С геометрической точки зрения, евклидова мера расстояния может оказаться бессмысленной, если признаки измерены в разных единицах. Поэтому путем стандартизации было произведено нормирование каждого признака. Все вышеуказанные операции осуществлялись посредством программы SPSS Statistics. Проведенная классификация позволила понять взаимосвязи между признаками и перейти к процессу выработки предложений по развитию структуры территориальной системы интерзонального типа.

Объектом проведенного исследования является территория Ангаро-Енисейского макрорегиона, в пределах которого сформировалась, функционирует и продолжает развиваться совокупность населенных мест. Системный подход – направление методологии, в основе которого лежит исследование объектов как систем, а последнее – есть целостное множество взаимосвязанных элементов. Система макрорегиона состоит из взаимодействующих и взаимосвязанных поселений. Она выражает иерархию населенных пунктов, имеющих свой социально-производственный потенциал, в которой определяющее значение принадлежит связям по населению.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Проблемы и основные направления развития городов, расселения и градостроительства – популярная междисциплинарная тема научно-исследовательских работ социально-экономической географии и региональной экономики, территориального планирования и градостроительства. Вопросам расселения населения посвящены работы В.В. Владимирова, Н.И. Наймарка, И.Г. Лежавы, В.А. Колясникова, М.В. Шубенкова, А.Г. Мазаева.,

³Моосмюллер Г., Ребик Н.Н. Маркетинговые исследования с SPSS: учеб. пособие. М.: ИНФРА-М, 2009. 160 с.

О.М. Благодетелевой, В.Ю. Спиридонова и др.

Особенностями расселения в зонах Арктики, Крайнего Севера и Сибири занимались географы Г.М. Лаппо, В.М. Мякиенков, А.А. Анохин, В.М. Грузинов, Н.Ю. Замятина, А.Н. Пиласов, А.П. Обедков, Л.А. Безруков, В.М. Котляков и экономисты С.И. Яковлева, В.В. Фаузер, В.А. Бородин, И.В. Митрофанова, Н.А. Серова, Н.Г. Шишацкий, Л.В. Шмидт, В.С. Антонюк, Н.П. Иванов.

Сравнительный анализ состояния теоретических исследований процессов расселения и прикладных разработок в этой области в России и некоторых развитых странах Европы показал, что: «Отечественная теория расселения, как правило, занимается только дискретной сетью поселений, а не всей территорией рассматриваемого региона, как это принято в большинстве зарубежных школ» [2, с. 280]. Предложенный на примере разработки региональной схемы расселения Дальнего Востока принцип построения интерзональной структуры СНМ [2, с. 85 рис. 4] сохранился в виде методологических положений отечественной теории расселения в «...условиях зоны Севера и приравненных к ней слабоосвоенных (пионерных) районов» [2, с. 84]. Между тем, «Межзональная интеграция Севера с соседними территориями по сравнению с советским периодом стала менее заметной, так как уменьшилось общее взаимодействие и развитие связей между Севером и остальными регионами страны» [9, с. 27]. За последнее время не появилось сколько-нибудь заметных публикаций в области теории расселения, посвященных перспективам формирования интерзональных СНМ. Самые новые материалы исследований в основном посвящены пространственному развитию территорий в разрезе широтных зон.

Особое внимание сосредоточено на Арктической зоне. «В XXI в. Мировая Арктика уверенно превращается из северной периферии в зону пристального внимания всех мировых супердержав» [10, с. 19]. В мае 2017 г. был опубликован доклад, содержащий рекомендации, имеющие важное значение для согласования растущих интернациональных интересов к Арктике⁴. Высказывается мнение, что для неарктических стран сейчас представляется удобный случай внести свой вклад в развитие инновационных технологий и инструментов регулирования и в связи с этим в Приполярный кодекс должны быть внесены положения о необходимости промышленной кооперации

[11, с. 73]. Взгляд в будущее развитие Арктической зоны показывает рост населения на 20% к 2030 г., увеличение морской торговли на 50% через 10 лет, увеличение потребления энергии на 5% [12, с. 37]. «Специалисты показали, что 60–70% всех затрат в Арктике связано с транспортом» [13, с. 15]. Возможно, в этом кроется повышенное внимание к проблемам функционирования всех видов транспорта и формирования транспортной инфраструктуры Российской Арктики. Исследования проводятся не только экономистами, но и географами, энергетиками, военными специалистами, социологами, математиками и другими. «В целом анализ современного состояния транспортной инфраструктуры АЗРФ подтверждает наличие серьезных диспропорций в ее развитии. Несмотря на благоприятные тенденции в работе всех видов транспорта, арктическая транспортная система характеризуется неразвитостью и низким техническим состоянием транспортной сети, высоким износом подвижного состава и множеством других проблем» [14, с. 54].

Развитие АЕМ как региона, являющегося частью Восточной Сибири, зависит от экономических эффектов, которые может дать модернизация Транссибирской железнодорожной магистрали. Оценка эффектов от инвестиционных проектов в развитии железнодорожной сети на основе микроэкономического моделирования показала, что: «По существу, данные затраты – это не производственные издержки, а инвестиции в человеческий капитал, увеличивающие демографический потенциал Сибири и Дальнего Востока, повышающие качество жизни населения» [15, с. 767].

Макроэкономическое моделирование было направлено на решение такой задачи, как: «...использование ...уникального транспортно-транзитного потенциала России ...определение возможных транзитных товаропотоков через железнодорожную систему Российской Федерации на фоне существующих объемов морской торговли, потенциальных проектов в рамках китайской программы "Один пояс, один путь", а также потенциальных торговых потоков из Японии и Южной Кореи» [15, с. 767]. Заинтересованность Южной Кореи в осуществлении транспортно-логистического доступа к Северным и Арктическим районам России подтверждается ее участием в 2016 г. в конференции о партнерстве Торгового флота в полярных водах и обсуждением в рамках семинара участия Кореи

⁴Status on Implementation of the AMSA 2009 Report Recommendations. Arctic Council. 2017. May. С. 1–23.

в осуществлении арктических проектов [16, с. 30–36].

Также рассматривалось включение работ Корейского гидрографического и океанографического агентства в стратегический план исследований Арктики на 2015–2025 гг. [17, с. 51–64].

Особый интерес представляет новый взгляд на освоенческий процесс, выявление новейших (постсоветских) тенденций и оценка предшествующей истории освоения: «...сделан вывод о том, что сегодня здесь действуют фундаментально другие экономические эффекты, чем в советское индустриальное время; что в целом современный процесс хозяйственного освоения характеризуется существенно большей пространственной неравномерностью, центро-периферийностью, многоакторностью, беспрецедентной ролью ТНК-ресурсных корпораций как агентов глокализации; неоднородностью времени по стадиям освоенческого процесса и колоссальной ролью проектного управления (проектного финансирования, проектного законодательства, заточенных под конкретный проект нового ресурсного освоения)» [18, с. 74]. При этом вопросам расселения уделяется так мало внимания, что «становится очевидно, что в числе трех важнейших задач долгосрочного развития Арктики стоит задача совершенствования системы расселения населения ...что расселенческая тематика АЗРФ требует новых, более глубоких исследований на междисциплинарном уровне» [7, с. 40, 49].

Наименьшее количество публикаций посвящено районам Крайнего Севера и местностям, приравненным к районам Крайнего Севера. Перестроечный процесс негативно отразился на состоянии урбанизированности этих территорий: «Однако непосредственно после распада СССР важность и перспективность этих территорий отошли на второй план на фоне структурной перестройки экономики и ухудшения социально-экономической обстановки в стране. Реальные шаги по исправлению ситуации стали предприниматься только с 2010-х гг., т.е. после почти двух десятилетий стихийного развития и деиндустриализации зоны Крайнего Севера» [19, с. 665–666].

Объективный взгляд на роль этих территорий в укреплении Российского пространства заключается в том, что: «Подзона Ближнего Севера должна рассматриваться как своеобразная буферная территория между регионами Главной полосы расселения и районами Среднего и Дальнего Севера. В ее пределах целесообразно формирование опорных

центров освоения северных территорий и базовых поселений по обслуживанию вахтовых и временных рабочих поселков районов Крайнего Севера» [20, с. 1037].

Самой обжитой и освоенной широтной зоной Сибири является южная. При планировании пространственного развития Сибири необходимо учитывать тяготение ее расселенческих структур к главным транспортным магистралям, с одной стороны, и важнейшим городам и городским агломерациям, – с другой. «Так называемая Основная полоса расселения России проходит по югу Российской Федерации. Эта зона объединяется Великой Транссибирской магистралью и БАМом. Транссиб – самая продолжительная железнодорожная трасса в мире. Однако в настоящий момент эта магистраль не соответствует современным требованиям, предъявляемым к железным дорогам. В то же время вдоль Транссиба сосредоточены огромные людские и природные ресурсы. Эта трасса незамедлительно требует существенного обновления» [21, с. 46]. На ней расположены все Сибирские агломерации.

В настоящее время наблюдается рост интереса к вопросам формирования агломераций и концепциям, согласно которым должно осуществляться их развитие. При этом градостроители расходятся во мнении о том, что такое *агломерация*. «Исследование эволюции представлений об агломерации показывает движение понимания ее как объекта (от скопления населенных мест к среде), развитие методологии (от социально-аспектного подхода к системному, синергетическому, стратегическому и другим подходам) и принципов (от «гармонизации функций» к «системной организации»)» [22, с. 14]. «Процессы агломерирования связаны не только с формированием физической формы города, но и с количеством и типами видов деятельности, обеспечивающими его функциональное единство» [23, с. 154].

Повышение роли городов в развитии общества, концентрация и интенсификация городских видов деятельности приводит к усложнению форм расселения.

Поэтому «Многогранные и неоднозначные агломерационные процессы в условиях такой крупномасштабной по площади страны, как Российская Федерация, объективно должны стать одним из элементов национальной региональной политики, что требует снятия административных барьеров и развития институциональной среды в виде должного нормативно-правового обеспечения» [24, с. 785].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ожидаемые изменения структуры территориальной системы расселения интерзонального типа АЕМ выражаются в росте, увеличении и расширении освоенных территорий, в ускоренном формировании региональных центров, агломераций и других узлов концентрации населения, в усложнении формы градостроительных образований, усложнении опорного каркаса расселения и повышения интеграции субъектов, входящих в макрорегион.

Способность структуры к совершенствованию во многом определяет особенности поведения территориальной системы и возможности управления ею. Из пятидесяти пяти городов макрорегиона сравнительно быстро придать положительную динамику его развитию могут только встроенные в структуру каркаса расселения России Красноярская и Иркутская агломерации, имеющие численность населения 1 355 963 и 1 247 783 чел. соответственно.

Красноярская агломерация имеет компактную форму и сетевую структуру (рис. 1). Иркутская агломерация имеет линейную форму и радиально-лучевую структуру (рис. 2).

Красноярск и Иркутск вошли в перечень из девятнадцати крупных и крупнейших городских агломераций федерального уровня, определенных Стратегией как центры экономического роста, обеспечивающие более одного процента суммарного прироста валового регионального продукта субъектов РФ.

Два города системы расселения АЕМ, – Норильск и Дудинка, существуют автономно в Арктической зоне Красноярского края, «...являющемся крупнейшим по площади субъектом на азиатском Севере...» [25, с. 22].

На территории Норильска, имеющего сопоставимую с Красноярском территорию (4509 км² и 4556 км² соответственно), в 7,5 раз меньше плотность населения. Это «...очаговое моноцентрическое расселение, сформировавшееся вдали от всех урбанизированных территорий...» [26, с. 18]. Для оценки достигнутого уровня сложности градостроительных образований, расположенных на территории АЕМ, необходимо их упорядоченное описание и классификация. Исследование на втором этапе широкого набора структурных характеристик территориальных систем расселения АЕМ позволило выделить 31 градостроительное образование. В состав Основной полосы расселения входит девятнадцать городов – центров градостроительных образований, семь городов расположены в местностях, приравненных к районам Крайнего Севера и пять

городов находятся в районах Крайнего Севера (табл. 1).

В состав критериев, характеризующих урбанизационную структуру градостроительных образований, вошла: «...*степень контрастности заселения*».

Отражает отношение преобладающей плотности населения (т. е. плотности населения, при которой проживает подавляющее большинство населения) к плотности населения территории» [25, с. 26].

Так как во всех градостроительных образованиях городское население преобладает над сельским, то показатели степени контрастности заселения рассчитывались как отношение плотности городского населения к плотности населения, проживающего в границах градостроительного образования; средняя плотность населения чел/км², вычислялась как «...*классическая физическая плотность населения*», вычисляемая как отношение численности населения к площади территории (в км²)» [25, с. 23], (для сельского населения в отдельности); значения социально-производственного потенциала соответствуют приведенным в табл. 1 [6, с. 862]; коэффициент агломеративности рассчитывался по формуле 1; коэффициент формы рассчитывался по формуле 2.

Границы территории градостроительного образования (в км²) были определены и обозначены так, как изображено на рис. 1, А и 2, А, используя следующие принципы. Для каждого города была рассчитана величина радиуса зоны его влияния по формуле, введенной в научный оборот В.А. Шупером:

$$R_H = \sqrt[3]{\frac{H}{4}}, \quad (3)$$

где H – численность населения города.

Затем вдоль транспортных магистралей, соединяющих между собой города, выделялась зона шириной в 25 км с обеих сторон, обоснованная ЦНИИП градостроительства как расстояние, превышение которого является неблагоприятным для промышленного и гражданского строительства. Радиус влияния центра агломерации города Красноярска с численностью населения 1 095 286 чел. составляет 64,9 км (см. рис. 1).

Радиус влияния центра агломерации г. Иркутска с численностью населения 623 869 чел. составляет 53,8 км (см. рис. 2).

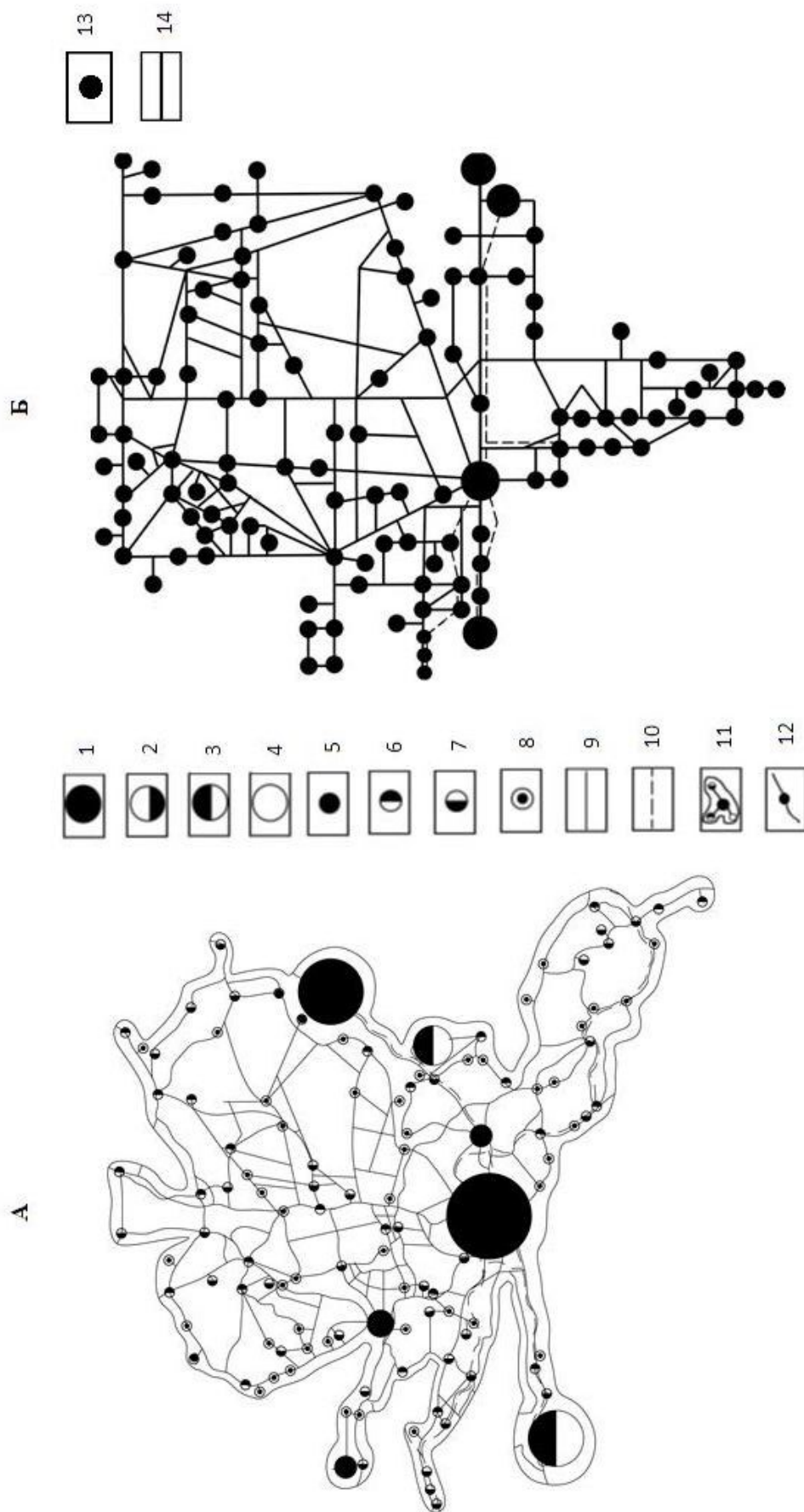


Рис. 1. Красноярск: крупнейшая агломерация, образованная совокупностью компактно расположенных населенных пунктов и территорий между ними с общей численностью населения 1355963 чел.: А – пространственная структура, где: 1 – города I ранга; 2 – города II ранга; 3 – города III ранга; 4 – города IV ранга; 5 – пгт; 6 – села; 7 – поселки; 8 – автодороги; 9 – железные дороги; 10 – железные дороги; 11 – ареалы расселения; 12 – отдельные поселения; Б – граф связности, где: 13 – вершины графа; 14 – ребра графа

Fig. 1. Krasnoyarsk: the largest agglomeration formed by a set of compactly located settlements and territories between them with a total population of 1355963 people: А – spatial structure, where: 1 – cities of I rank; 2 – cities of II rank; 3 – cities of III rank; 4 – cities of IV rank; 5 – villages; 6 – settlements; 7 – railways; 8 – highways; 9 – roads; 10 – roads; 11 – separate settlements; 12 – areas of settlement; 13 – vertices of the graph; 14 – edges of the graph

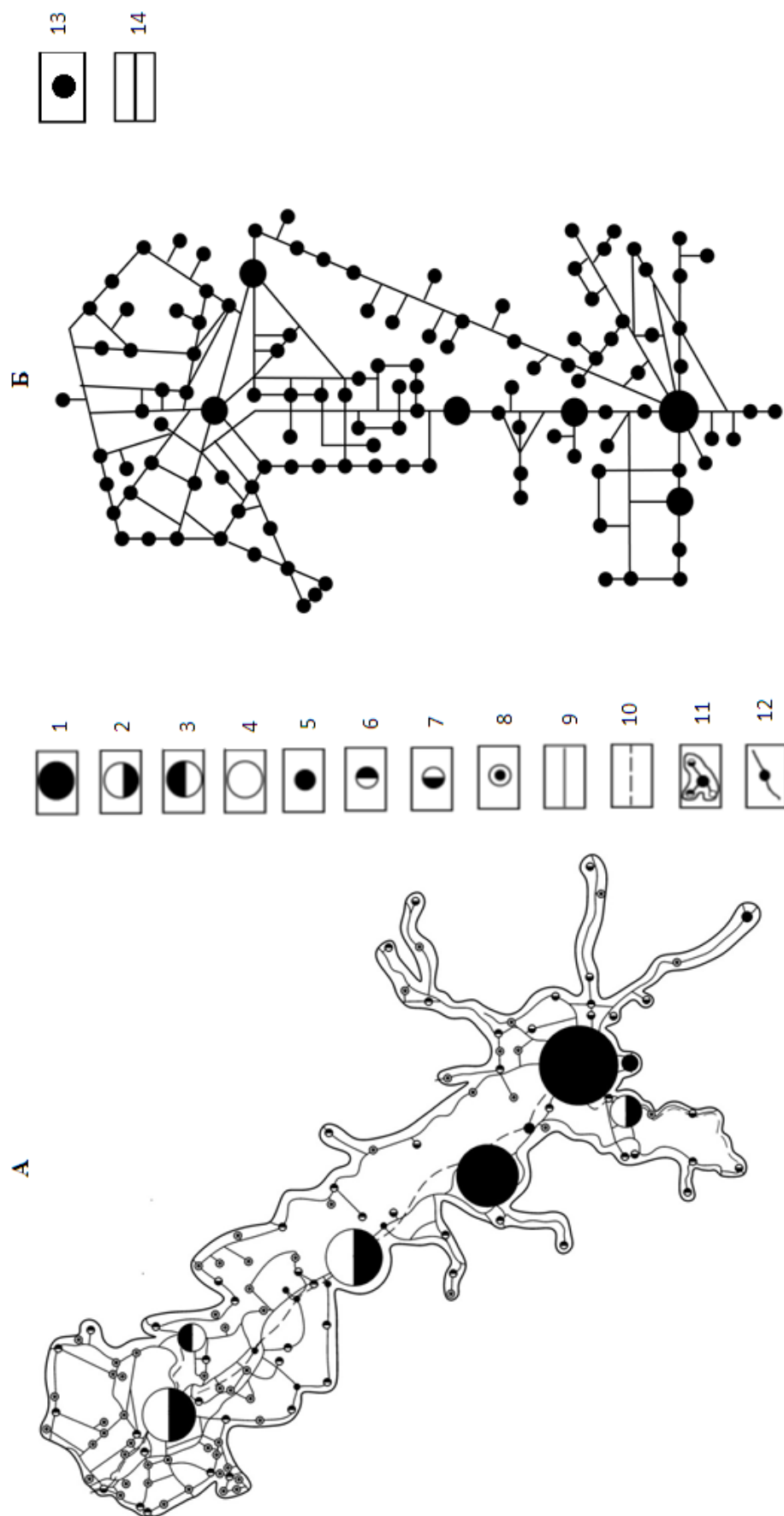


Рис. 2. Иркутск: крупная формирующаяся агломерация, образованная совокупностью компактно расположенных населенных пунктов и территорий между ними с общей численностью населения 1247783 человека; А – пространственная структура, где: 1 – города I ранга; 2 – города II ранга; 3 – города III ранга; 4 – города IV ранга; 5 – пгт; 6 – села; 7 – поселки; 8 – деревни; 9 – автодороги; 10 – железные дороги; 11 – ареалы расселения; 12 – отдельные поселения; Б – граф связности, где: 13 – вершины графа; 14 – ребра графа

Fig. 2. Irkutsk: a large emerging agglomeration formed by a set of compactly located settlements and territories between them with a total population of 1247783 people; А – spatial structure, where: 1 – cities of I rank; 2 – cities of II rank; 3 – cities of III rank; 4 – cities of IV rank; 5 – villages; 6 – settlements; 7 – highways; 8 – railways; 9 – highways; 10 – railways; 11 – areas of settlement; 12 – separate settlements; Б – a connectivity graph, where: 13 – vertices of the graph; 14 – edges of the graph

Таблица 1. Сопоставление урбанизационной структуры
 градостроительных образований Ангаро-Енисейского макрорегиона
Table 1. Comparison of the organizational structure of urban-planning formations
 of the Angara-Yenisei macroregion

Градостроительные образования			Степень контрастности заселения	Средняя плотность, чел/км ²		Социально-произ- водственный потенциал (СПП)	Коэффициент агломеративности, К _а	Коэффициент формы, К _ф
Город – центр ранг	Простран- ственная структура	Граф связности		Всего	Сельского			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Основная полоса расселения								
Красноярск – I	см. рис. 1А	см. рис. 1Б	0,93	297,6	21,7	4,14	4,3	24,1
Иркутск – I	см. рис. 2А	см. рис. 2Б	0,87	256,2	31,9	5,77	4,2	21,9
Артёмовск – IV			0,97	23,7	0,8	0,05	1,4	1,3
Слюдянка – II			0,92	102,1	8,37	0,38	2,5	1,2
Тайшет – III			0,88	78,7	9,36	0,38	2,1	4,0
Сорск – II			0,81	53,2	10,0	0,42	2,6	1,0
Алзамай – IV			0,71	24,57	7,06	0,08	1,3	3,0
Ужур - III			0,7	47,0	14,1	0,15	2,2	2,5
Боготол - III			0,73	43,5	11,8	0,22	1,2	2,25
Абаза - IV			0,62	73,4	27,5	0,13	2,4	1,25
Зеленогорск - II			0,78	56,6	12,2	1,03	3,9	18,6
Канск - II			0,78	85,3	18,5	0,78	3,7	16,9
Саяногорск - II			0,74	96,8	25,4	0,42	3,0	6,25
Тулун - II			0,76	94,31	22,9	0,38	2,6	4,75
Шарыпово - II			0,79	81,3	17,3	0,4	2,7	7,25

Саянск - I			0,85	113,1	17,5	1,01	2,6	4,9
Нижнеудинск- II			0,89	158,8	17,9	0,39	2,4	1,7
Ачинск - I			0,87	118,2	15,5	1,24	4,1	9,0
Абакан - I			0,88	190,3	12,3	2,43	4,2	13,0
Местности, приравненные к районам Крайнего Севера								
Бодайбо – III			1,0	88,8	0,0	0,34	2,3	1,0
Киренск – IV			0,99	74,9	0,83	0,13	2,2	1,5
Железнодорож- Илимский – III			0,97	87,5	2,62	0,28	1,5	2,0
Лесосибирск – II			0,88	100,2	12,0	0,67	3,2	3,7
Усть-Илимск – II			0,97	251,1	8,19	0,57	1,1	1,5
Братск – I			0,98	225,8	4,7	1,23	0,8	3,0
Кодинск – III			0,83	60,3	10,4	0,16	1,4	3,0
Районы Крайнего Севера								
Туран – IV			0,64	15,3	5,4	0,09	1,0	2,0
Шагонар – IV			0,67	41,1	13,7	0,11	1,8	1,75
Чадан – IV			0,58	46,1	19,4	0,1	2,9	2,6
Ак-Довурак – IV			0,14	30,4	25,9	0,14	2,7	2,0
Кызыл – I			0,92	338,6	26,9	0,88	3,0	2,5

Наиболее подходящим для иерархического кластерного анализа рассматриваемых

градостроительных образований является метод внутригрупповых связей (метод «дальнего

соседа»⁵). По выбранному методу расстояние между кластерами вычисляется как среднее расстояние между всеми возможными парами объектов, принадлежащих обоим кластерам, в том числе объектов, расположенных внутри одного и того же кластера.

Наиболее отражающим существующий уровень развития градостроительных образований оказалось разделение на 3 кластера (рис. 3). Судить о качестве разбиения градостроительных образований можно путем сравнения средних значений по группам со

средним значением всей совокупности объектов в целом. Данные приведены в табл. 2.

Насколько различия между ними существенны, можно судить по значению t-критерия Стьюдента: если его значение выше уровня значимости, то это является признаком хорошего разбиения. Кроме того, по данным t-статистики можно установить, какой из показателей классификации оказал наибольшее влияние на формирование групп. Результаты проверки представлены в табл. 3⁶.

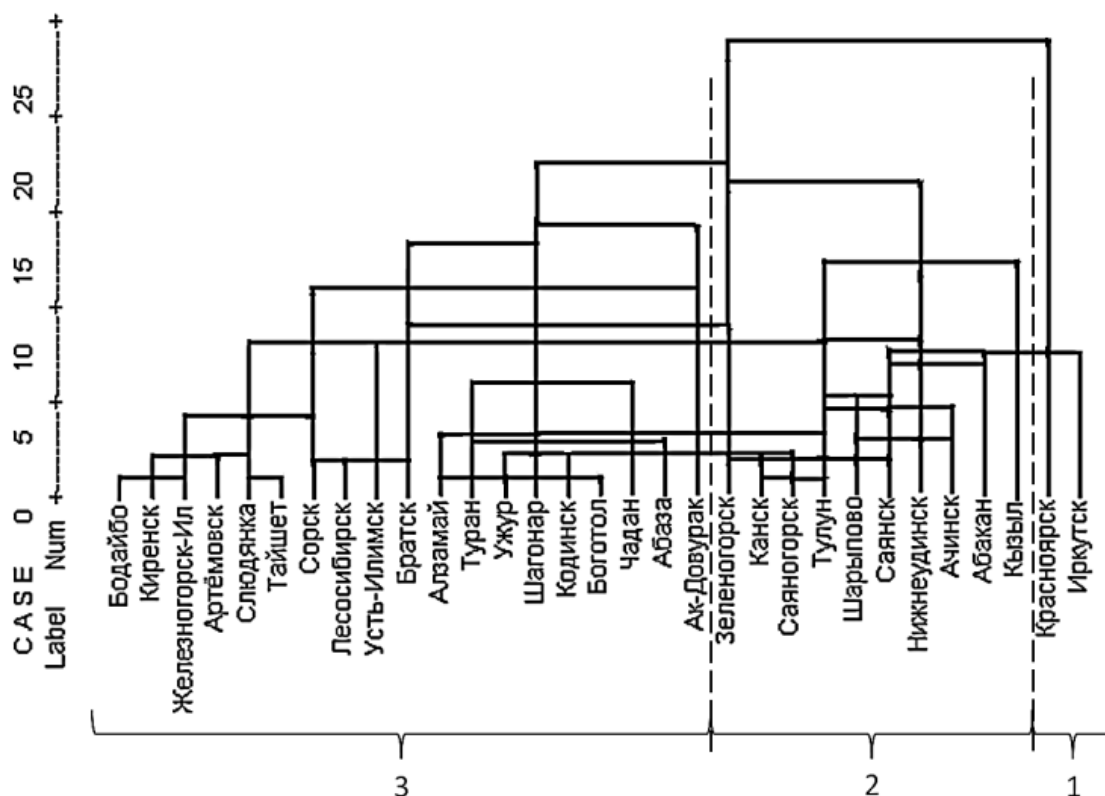


Рис. 3. Дендрограмма, построенная в результате иерархического кластерного анализа по методу внутригрупповых связей

Fig. 3. A dendrogram constructed as a result of hierarchical cluster analysis using the method of intra-group relations

Таблица 2. Средние значения показателей по группам

Table 2. Average values of indicators by groups

Группа	Степень контрастности заселения	Средняя плотность всего населения	Средняя плотность сельского населения	Социально-производственный потенциал (СПП)	Коэффициент агломеративности, U	Коэффициент формы, Кф
1	0,9	276,9	26,8	4,9550	4,25	23,0
2	0,826	133,3310	19,64	0,896	3,22	8,485
3	0,7889	77,2458	10,1121	0,2963	1,9263	2,1342
Всего	0,8180	108,2187	14,2623	0,7903	2,4935	5,529

⁵Многомерный статистический анализ в экономических задачах: компьютерное моделирование в SPSS: учеб. пособие/ под ред. И.В. Орловой. М.: Вузовский учебник, 2009. 310 с.

⁶Хили Дж. Статистика. Социологические и маркетинговые исследования. 6-е изд. / Пер. с англ и под общей ред. к.ф.-м.н. А.А. Руденко. Киев: ДиаСофтЮП; СПб.: Питер, 2005. 638 с.

Таблица 3. Проверка результатов по t-критерию Стьюдента

Table 3. Checking the results according to the Student's t-test

Показатель	Значение t-критерия	Уровень значимости при 0,05
1 степень свободы (1-ая группа)		
Степень контрастности заселения	30,000	12,706
Средняя плотность всего населения	13,377	
Средняя плотность сельского населения	5,255	
Социально-производственный потенциал	6,080	
Коэффициент агломеративности	85,000	
Коэффициент формы	20,909	
9 степеней свободы (2-ая группа)		
Степень контрастности заселения	41,508	2,262
Средняя плотность всего населения	5,146	
Средняя плотность сельского населения	13,501	
Социально-производственный потенциал	4,536	
Коэффициент агломеративности	14,842	
Коэффициент формы	4,580	
18 степеней свободы (3-я группа)		
Степень контрастности заселения	16,282	2,101
Средняя плотность всего населения	5,378	
Средняя плотность сельского населения	5,710	
Социально-производственный потенциал	4,525	
Коэффициент агломеративности	11,890	
Коэффициент формы	10,374	

Как видно из табл. 3, все значения t-критерия Стьюдента по рассматриваемым шести показателям отвечают условию проверки и являются выше соответствующего числу степеней свободы уровня значимости, за исключением двух показателей первой группы.

Это объясняется внутренними различиями между двумя главными агломерациями Ангара-Енисейского макрорегиона – Иркутской и Красноярской.

Два показателя (социально-производственный потенциал и средняя плотность сельского населения) имеют наименьшую значимость для выделения первой группы, на первом месте находится коэффициент агломеративности, на втором – степень контрастности заселения. Эти и оставшиеся показатели соответствуют требованиям их существенности. Во второй и третьей группах все показатели подтверждают хорошее качество разбиения. На первом месте находится показатель степени контрастности заселения, на втором – коэффициент агломеративности.

Таким образом, можно говорить об успешности проведенного иерархического кластерного анализа.

С учетом «...тенденций развития новых форм градостроительной организации территорий страны и регионов» [27, с. 74] в классификацию типов градостроительных

образований макрорегиона интерзонального типа АЕМ были включены и морфологические, и функциональные структурные характеристики, несмотря на то, что «...методика такого сравнения территориальных подсистем до конца еще не разработана» [8, с. 8].

Поэтому в исследовании были предприняты усилия по построению такой методики. «При обсуждении роли градостроительных систем в новых условиях развития страны отмечена необходимость выделения новых типов территориальных образований и введения классификаций для такого рода системных зональных образований (СЗО)» [27, с. 74].

В окончательном варианте классификации (табл. 4) представляется возможным заменить нейтральное определение формы расселения «градостроительное образование» на связанное с особенностями развития интерзональных систем расселения СЗО:

1. Макрорегиональные и урбанистические агломерации – это агломерации, роль которых незаменима в обеспечении целостности системы расселения макрорегиона.

2. Перспективные – это устойчивые градостроительные образования, расположенные в основной полосе расселения.

3. Традиционные – это города, поселки городского типа и существующие с ними в тесной взаимосвязи сельские населенные пункты.

Таблица 4. Классификация системных зональных образований макрорегиона
 интерзонального типа

Table 4. Classification of systemic zonal formations of the macro-region of the interzonal type

Системные зональные образования (СЗО)	Численность населения, чел	Площадь территории ареала расселения, км ²	Социально производственный потенциал (СПП), ранг	Средняя плотность (всего населения), чел/км ²	Средняя плотность (сельского населения), чел/км ²	Степень контрастности заселения	Коэффициент агломеративности, U	Коэффициент формы, Ф
Макрорегиональные и урбанистические агломерации	выше 1 000 000	выше 4500	выше 4 (I)	выше 250	выше 20	от 0,87 и выше	выше 4,2	выше 20
Перспективные	40 000–400 000	от 275	0,38–2,4 (I–III)	от 56 и выше	от 12 и выше	от 0,74 и выше	2,1–4,2	2–20
Традиционные	от 9000	от 260	0,05–0,6 (II–IV)	от 24 и выше	0–12	от 0,14 и выше	0,8–2,9	1–3

В классификации объективно отражена, казалось бы, очевидная неоднородность и даже контрастность сложившихся систем расселения на территориях 4-х широтных зон. В то же время, выявленные значения структурных характеристик, послуживших основанием для разделения системных образований, являются инструментом для конструирования путей развития АЕМ как единого объекта территориального планирования на базе интеграции региональных подсистем на основе сочетаемости типологической и узловой проекции планирования и управления расселением.

В рамках мегапроекта *Енисейская Сибирь*, который охватывает Красноярский край, Республики Хакасия и Тыва, предусмотрено, что «ядром транспортной инфраструктуры северной и арктической зоны Красноярского края должна стать сеть широтных и меридиональных железных дорог. Такая сеть свяжет южные и центральные районы Енисейской Сибири, а также Западной Сибири с месторождениями полезных ископаемых северных и арктических территорий Красноярского края, обеспечит выход к Северному морскому пути» [28, с. 69]. Только непосредственная меридиональная

связь Красноярской и Иркутской агломерации с Северным морским путем позволит распространить их высокий СПП на развитие всего макрорегиона.

В местностях, приравненных к районам Крайнего Севера, расположены только два города I ранга – города Кызыл и Братск. Из-за оторванности от Транссиба г. Кызыл будет сохранять роль административного центра Республики Тыва. Как центр представляет интерес г. Братск, который вместе с городами 2-го ранга Усть-Илимском и Лесосибирском мог бы сыграть ключевую роль в поднятии фронта освоения до широтного участка р. Ангары. Но демографические проблемы, отраженные в проекте изменений Генерального плана города⁷, – уменьшение численности населения с 229,3 тыс. чел. (2017 г.) до 226,5 тыс. чел. (2030 г.) не выглядят обнадеживающими, тем более, что до вышеназванной величины численность населения упала уже в 2020 г. (226 269 чел.), а в 2022 г. составила 222 258 чел.⁸. И тем не менее «...долгосрочная стратегия экономического развития фронта – это укрепление местных связей между видами деятельности» [29, с. 14].

⁷Генеральный план муниципального образования город Братск (проект изменений). Том 1. Положения о территориальном планировании (в редакции февраля 2019 г.) // Российский институт градостроительства и инвестиционного развития «Гипрогор». М., 2018. 70 с.

⁸Город Братск. Общие сведения и история // Города России [Электронный ресурс]. URL: https://города-россия.рф/sity_id.php?id=79 (14.01.2023).

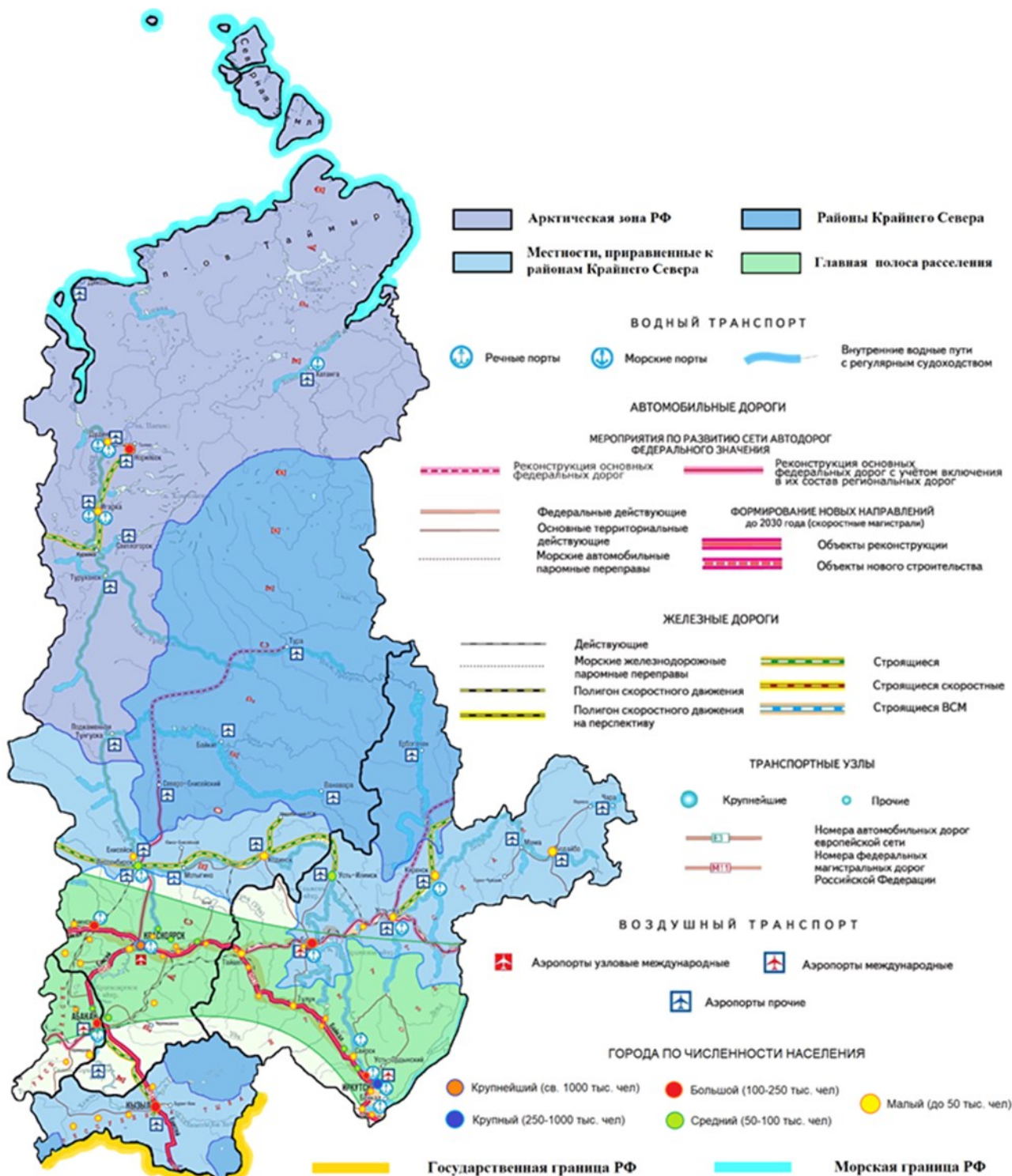


Рис. 4. Структура расселения Ангаро-Енисейского макрорегиона
Fig. 4. Settlement structure of the Angara-Yenisei macroregion

Очевидно, что «создание на Севере единого планировочного каркаса, состоящего из дублирующих планировочных осей, магистралей постоянного и сезонного действия, повысит устойчивость и надежность территориальной организации и обеспечит стабильность функционирования населенных мест»

[30, с. 29]. Необходимо опережающее развитие транспортной инфраструктуры, которое будет способствовать формированию дублирующего широтного опорного каркаса зоны Севера и повысит потенциал развития центров, расположенных за пределами основной полосы расселения в Нижнем Приангарье и претендующих

на роль опорных центров расселения для освоения высоких широт – это города Лесосибирск и Енисейск, Кодинск. Появление меридионального участка опорного каркаса расселения запустит процесс интеграции Арктической зоны, районов Севера, районов, приравненных к Крайнему Северу с основной полосой расселения (рис. 4).

Следует признать, что на территории АЕМ идет процесс формирования сети поселений, и необходимо предпринять еще немало усилий для того, чтобы сформировать интегрированную систему расселения макрорегиона. Единицей развития должен стать макрорегион, а система расселения населения должна формироваться на базе модели его пространственного развития. Исследование содержания разделов стратегий социально-экономического развития регионов-субъектов РФ, посвященных пространственному моделированию, показало, что преобладают каркасные модели (36%), на втором месте кластерные модели (34%) и функциональные модели – на третьем (30%) [31, табл. 2, с. 8, рис. 6, с. 13]. Для каркасных моделей «...следует отметить урбанизирующую роль линейных элементов опорного каркаса. Она находит свое отражение в диалектике перехода от зон очаговой и дискретной урбанизации к зоне линейно-узловой урбанизации, формирующейся на основе полимагистралей» [21, с. 1037]. Также представляет интерес «...методология оценки потенциала формирования саморазвивающейся макрорегиональной агломерации ... для исследований процессов межрегиональной интеграции и экономического сотрудничества, способствующих пространственному выравниванию и развитию регионов России» [32, с. 19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение территории АЕМ как целостного объекта исследования показало, что формированию единой расселенческой структуры на его территории будут, в первую очередь,

способствовать шаги по повышению управляемости макрорегионом, в состав которого вошли четыре субъекта РФ с образованием общих для макрорегиона аппаратов законодательной и исполнительной власти.

Градостроительным кодексом предусмотрена возможность создания схемы территориального планирования двух и более субъектов РФ. «С другой стороны, по ст. 78 Конституции РФ «Центр полномочен формировать территориальные сети собственных органов, не обязанные совпадать с границами регионов-субъектов» [33, с. 15]. Ожидаемая трансформация транспортной инфраструктуры показывает, что дать ответ о влиянии изменений в структуре территориальной системы расселения интерзонального типа на процессы интеграции входящих в АЕМ субъектов РФ станет возможным в полном объеме только тогда, когда процесс достройки транспортных путей в широтных зонах макрорегиона (автомобильных, железнодорожных, водных, воздушных) наберет полную силу.

В настоящий момент важно стабилизировать существующую сеть поселений, остановить отток населения, способствовать росту потенциала саморазвития, увеличивать устойчивость центров, входящих в опорный каркас расселения Южной зоны и претендующих на ведущие роли в формирующемся каркасе расселения Северной зоны. Новое геополитическое положение России и перспективы ее вхождения в мирохозяйственные связи требуют активизации развития сети поселений и инфраструктуры и переориентации векторов с широтных на меридиональные (интерзональные) связи с выходами в Китай и Монголию с восстановлением связи с транскорейской магистралью. Необходимо расширять масштабы междисциплинарных исследований по научному обеспечению обосновывающими материалами процессов разработки программ, прогнозов, схем и проектов макроуровня.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чугуевская Е.С. О территориально-пространственных аспектах стратегии пространственного развития Российской Федерации // Academia. Архитектура и градостроительство. 2017. № 1. С. 67–71. EDN: YMQVNN.
2. Владимиров В.В., Наймарк Н.И. Проблемы развития теории расселения в России. М.: Едиториал УРСС, 2002. 376 с.
3. Митрофанова И.В., Селюгин В.В., Иванов Н.П. «Белые пятна» стратегии пространственного развития России: обсуждение проекта // Региональная экономика. Юг России. 2019. Т. 7. № 1. С. 42–

55. EDN: JFIIME.
<https://doi.org/10.15688/re.volsu.2019.1.4>.
4. Обедков А.П. Особенности размещения населения и современные тенденции в развитии расселения в России // Россия: тенденции и перспективы развития: сб. тр. XVIII Междунар. науч. конф. «Модернизация России: приоритеты, проблемы, решения» (г. Москва, 20–21 декабря 2018 г.). М.: Институт научной информации по общественным наукам РАН, 2019. Т. 14. Ч. 1. С. 863–870.

5. Беляева Е.Л. Об опыте разработки «Градостроительного атласа России» и современном использовании его результатов // Academia. Архитектура и градостроительство. 2019. № 3. С. 90–98. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2019-3-90-98>. EDN: LEZBYV.
6. Перетолчина Л.В., Глебушкина Л.В., Шестаков А.В. Градостроительные предпосылки пространственного развития территории Ангаро-Енисейского макрорегиона // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9. № 4 (31). С. 858–870. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-4-858-870>. EDN: FBEQCH.
7. Фаузер В.В., Лыткина Т.С., Фаузер Г.Н. Особенности расселения в Арктической зоне России // Арктика: экология и экономика. 2016. № 2 (22). С. 40–50. EDN: ZBHYOD.
8. Архипов Ю.Р. Моделирование территориальных систем расселения. Казань: Изд-во Казанского университета, 1988. 122 с.
9. Благодетелева О.М. Теоретические поиски и практика формирования систем расселения северных территорий России // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2017. № 1 (32). С. 23–28. EDN: YJTLIX.
10. Фаузер В.В., Смирнов А.В. Мировая Арктика: природные ресурсы, расселение населения, экономика // Арктика: экология и экономика. 2018. № 3 (31). С. 6–20. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2018-3-6-22>. EDN: YMCFMT.
11. Lee H.K. Issues of Polar Code and Preparations for Its Enforcement. Communication Seminar on PAME Shipping (9 December 2016). 2016. P. 65–73.
12. Lee K.K. Prompt Port Facility. Communication Seminar on PAME Shipping (9 December 2016). 2016. P. 37–44.
13. Грузинов В.М., Зворыкина Ю.В., Иванов Г.В., Сычев Ю.Ф., Тарасова О.В., Филин Б.Н. Арктические транспортные магистрали на суше, акваториях и в воздушном пространстве // Арктика: экология и экономика. 2019. № 1 (33). С. 6–20. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-1-6-20>. EDN: GKYZOW.
14. Серова Н.А., Серова В.А. Основные тенденции развития транспортной инфраструктуры российской Арктики // Арктика и Север. 2019. № 36. С. 42–56. <https://doi.org/10.17238/issn2221-2698.2019.36.42>. EDN: DEKDTR.
15. Садовничий В.А., Осипов Г.В., Акаев А.А., Малков А.С., Шутьгин С.Г. Социально-экономическая эффективность развития железнодорожной сети Сибири и Дальнего Востока. Математическое моделирование и прогноз // Экономика региона. 2018. Т. 14. Вып. 3. С. 758–777. <https://doi.org/10.17059/2018-3-6>. EDN: XYYBYL.
16. Jond-Deog (Justin) Kim. Korea's Patnership with PAME. Korea Maritime Institute // Communication Seminar on PAME Shipping (9 December 2016). 2016. P. 30–36.
17. Iji Kim. Unmanned Hydrographic Survey in Polar waters. Korea Hydrographic and Oceanographic Agency // Communication Seminar on PAME Shipping (9 December 2016). 2016. P. 51–64.
18. Пилясов А.Н., Замятина Н.Ю. Освоение Севера 2.0: Вызовы формирования новой теории // Арктика и Север. 2019. № 34. С. 57–76. <https://doi.org/10.17238/issn2221-2698.2019.34.57>. EDN: OWJNXM.
19. Чайка Е.Е. Трансформация городских систем расселения районов Крайнего Севера в постсоветский период // Теоретические и прикладные проблемы географической науки: демографический, социальный, правовой, экономический и экологический аспекты: материалы Международной научно-практической конференции. 2019. Т. 1. (г. Воронеж, 12–16 ноября 2019 г.). Воронеж: Воронежский государственный педагогический университет, 2019. С. 665–671. EDN: KLRQGS.
20. Обедков А.П. Формирование опорного каркаса северных территорий как фактор модернизации и укрепления Российского пространства // Россия: тенденции и перспективы развития: сб. тр. круглого стола по проблемам стратегического проектирования социально-экономического развития России (г. Москва, 1 января –1 мая 2018 г.). М.: Институт научной информации по общественным наукам РАН, 2018. Т. 13. Ч. 1. С. 1029–1038. EDN: UTRAQG.
21. Лежава И.Г. Проблемы расселения восточных регионов России // Архитектура и строительство России. 2016. № 4 (220). С. 46–51. EDN: XGYNCB.
22. Колясников В.А. Развитие понятия «Городская агломерация» // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2015. № 2. С. 10–15. EDN: UCTJOP.
23. Shubenkov M.V., Khomyakov D.A. Space of the regional agglomerations and re-industrialization // Journal of Applied Engineering Science. 2016. Vol. 14. No. 1. P. 154-162. EDN: WUWFBJ. <https://doi.org/10.5937/jaes14-10217>.
24. Шмидт А.В., Антонюк В.С., Франгини А. Городские агломерации в региональном развитии: теоретические, методические и прикладные аспекты // Экономика региона. 2016. Т. 12. Вып. 3. С. 776–789.
25. Фаузер В.В., Лыткина Т.С., Смирнов А.В. Дифференциация арктических территорий по степени заселенности и экономической освоенности // Арктика: экология и экономика. 2017. № 4 (28). С. 18–31. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-4-18-31>. EDN: YMRLRZ.
26. Благодетелева О.М. Эволюция и современные тенденции развития систем расселения в районах Севера (на примере США, Канады и России) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2017. № 3. С. 5–25. <https://doi.org/10.15593/2409-5125/2017.03.01>. EDN: ZIAOHF.
27. Шубенков М.В. Градостроительные системы и их роль в новых условиях социального и экономического развития страны // Архитектура и

строительство России. 2016. № 4 (220). С. 74–75. EDN: XGYNDF.

28. Шишацкий Н.Г. Перспективы развития северных и арктических районов в рамках мегапроекта «Енисейская Сибирь» // Арктика и Север. 2018. № 33. С. 66–90. <https://doi.org/10.17238/issn2221-2698.33.66>. EDN: YTRNFZ.

29. Замятина Н.Ю., Пилясов А.Н. Новая теория освоения (пространства) Арктики и Севера: полимасштабный междисциплинарный синтез // Арктика и Север. 2018. № 31. С. 5–27. <https://doi.org/10.17238/issn2221-2698.2018.31.5>. EDN: UUCECI.

30. Анохин А.А., Мякиненков В.М. Основные положения градостроительной политики и функционально-планировочного зонирования Крайнего

Севера и Арктики // Арктика. XXI век. Гуманитарные науки. 2015. № 3 (6). С. 21–32. EDN: VPECZR.

31. Яковлева С.И. Пространственные модели в стратегиях социально-экономического развития регионов России // Псковский регионологический журнал. 2014. № 17. С. 3–16. EDN: SJENCJ.

32. Бородин В.А., Мачин К.А., Любичкая В.А., Ерохин А.В. Оценка потенциала саморазвития региональной экономики и повышение ее эффективности на основе интеграции территорий в рамках макрорегиональной агломерации // Вопросы региональной экономики. 2017. № 3 (32). С. 18–25. EDN: ZJSRLJ.

33. Трейвиш А.И. География Российских кризисов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 1999. № 2. С. 15–16. EDN: MPCGKT.

REFERENCES

1. Chuguevskaya E.S. On the spatial and territorial aspects of the spatial development strategy of the Russian Federation. *Academia. Arkhitektura i gradostroitel'stvo = Academia. Architecture and construction*. 2017;1:67-71. (In Russ.). EDN: YMQVNN.
2. Vladimirov V.V., Naimark N.I. Problems of developing the theory of resettlement in Russia. Moscow: Editorial URSS; 2002. 376 p. (In Russ.).
3. Mitrofanova I.V., Selyutin V.V., Ivanov N.P. "Blind spots" of the strategy of spatial development of Russia: discussion of the draft strategy. *Regional economy. South of Russia*. 2019;7(1):42-55. (In Russ.). <https://doi.org/10.15688/re.volsu.2019.1.4>. EDN: JFIIME.
4. Obedkov A.P. Features of population placement and current trends in the development of settlement in Russia. *Rossiya: tendentsii i perspektivy razvitiya: sb. tr. XVIII Mezhdunarodnoi Nauchnoi Konferentsii «Modernizatsiya Rossii: priority, problemy, resheniya» = Russia: Trends and prospects of development: Sat. tr. of the XVIII International Scientific Conference "Modernization of Russia: Priorities, problems, solutions"*. 20-21 December 2018, Moscow. Moscow: Institute of scientific information on social sciences of the Russian Academy of Sciences; 2019. Vol. 14. Part. 1. p. 863-870. (In Russ.).
5. Belyaeva E.L. On the experience of developing the "urban development atlas of Russia" and the modern use of its results. *Academia. Arkhitektura i gradostroitel'stvo = Academia. Architecture and construction*. 2019;3:90-98. (In Russ.). <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2019-3-90-98>. EDN: LEZBYV.
6. Peretolchina L.V., Glebushkina L.V., Shestakov A.V. Urban planning prerequisites for spatial development of the Angara-Yenisei macroregional territory. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2019;9(4):858-870.

(In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-4-858-870>. EDN: FBEQCH.

7. Fauzer V.V., Lytkina T.S., Fauzer G.N. Features of population settlement in the arctic zone of Russia. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: ecology and economy*. 2016;2:40–50. (In Russ.). EDN: ZBHYOD.

8. Arkhipov Y.R. Modelling of territorial settlement systems. Kazan: PH Kazan University; 1988. 122p.

9. Blagodeteleva O.M. Theoretical search and practice of the formation settlement in the territory of Russian North. *Akademicheskii vestnik UralNIiproekt RAASN*. 2017;1:23-28. (In Russ.). EDN: YJTLIX.

10. Fauzer V.V., Smirnov A.V. The World's Arctic: natural resources, population distribution, economics. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: ecology and economy*. 2018;3:6-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2018-3-6-22>. EDN: YMCFMT.

11. Lee H.K. Issues of Polar Code and Preparations for Its Enforcement. *Communication Seminar on PAME Shipping*. 9 December 2016. p. 65–73.

12. Lee K.K. Prompt Port Facility. *Communication Seminar on PAME Shipping*. 9 December 2016. p. 37–44.

13. Gruzinov V.M., Zvorykina Y.V., Ivanov G.V., Sychev Yu.F., Tarasova O.V., Filin B.N. The Arctic main transport on-shore, offshore, and air space routes. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: ecology and economy*. 2019;1:6-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-1-6-20>. EDN: GKYZOW.

14. Serova N.A., Serova V.A. Critical tendencies of the transport infrastructure development in the Russian Arctic. 2019;36:42-56. *Arktika i Sever = Arctic and North*. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn2221-2698.2019.36.42>. EDN: DEKDTR.

15. Sadovnichii V.A., Osipov G.V., Akaev A.A., Malkov A.S., Shuigin S.G. Socio-economic effectiveness of the development of the railway network in

- Siberia and the far east: mathematical simulation and forecast. *Jekonomika regiona = Economy of regions*. 2018;14(3):758-777. (In Russ.). <https://doi.org/10.17059/2018-3-6>. EDN: XYYBYL.
16. Jond-Deog (Justin) Kim. Korea's Patnership with PAME. Korea Maritime Institute. *Communication Semi-nar on PAME Shipping*. 9 December 2016. p. 30-36.
17. Iji Kim. Unmanned Hydrographic Survey in Polar waters. Korea Hydrographic and Oceanographic Agen-cy. *Communication Seminar on PAME Shipping*. 9 December 2016. p. 51-64.
18. Pilyasov A.N., Zamyatina N.Y. Development of the North 2.0: Challenges of forming a new theory. *Arktika i Sever = Arctic and North*. 2019;34:57-76. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn2221-2698.2019.34.57>. EDN: OWJNXM.
19. Chaika E.E. Transformation of city systems of resettlement of the Extreme North regions during post-Soviet period. *Teoreticheskie i prikladnye problemy geograficheskoy nauki: demograficheskij, so-cial'nyj, pravovoj, jekonomicheskij i jekologicheskij aspekty: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Collection of the Conference materials. Theoretical and applied problems of geographical science: demographic, social, legal, economic, and ecological aspects: materials of the International Scientific and Practical Conference*. 12-16 November 2019, Voronezh. Voronezh: Voronezh State Pedagogical University; 2019. T. 1. p. 665-671. (In Russ.). EDN: KLRQGS.
20. Obedkov A.P. Formation of a backbone system of northern territories as a factor of modernisation and strengthening of the Russian territories. *Rossiya: tendentsii i perspektivy razvitiya: sbornik trudov kruglogo stola po problemam strategicheskogo proektirovaniya sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossii = Russia: Trends and prospects of development: proceedings of the round table on the problems of strategic design of socio-economic development of Russia*. 1 January-1 May 2018, Moscow. Moscow: Institute of scientific information on social sciences of the Russian Academy of Sciences; 2018. Vol. 13. P. 1. p. 1029-1038. (In Russ.). EDN: UTRAQG.
21. Lezhava I.G. Problems of settling in Russia's eastern regions. *Arkhitektura i stroitel'stvo Rossii = Architecture and Construction of Russia*. 2016;4:46-51. (In Russ.). EDN: XGYNCB.
22. Kolyasnikov V.A. The development of the concept of "Urban agglomeration". *Akademicheskii vestnik UralNIiproekt RAASN*. 2015;2:10-15. (In Russ.). EDN: UCTJOP.
23. Shubenkov M.V., Khomyakov D.A. Space of the regional agglomerations and re-industrialization. *Journal of Applied Engineering Science*. 2016;14(1):154-162. <https://doi.org/10.5937/jaes14-10217>. EDN: WUWFBJ.
24. Shmidt A.V., Antonyuk V.S., Frangini A. City agglomerations in regional development: theoretical, methodological, applied aspects. *Ekonomika regiona*. 2016;12(3):776-789. (In Russ.).
25. Lytkina T.S., Smirnov A.V., Fauzer V.V. Arctic territories differentiation by density of population and economic development. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: ecology and economy*. 2017;4:18-31. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-4-18-31>. EDN: YMRLRZ.
26. Blagodeteleva O.M. Evolution and current tendencies of the development of resettlement systems in the Northern regions (by the example of USA, Canada and Russia). *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika = Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Urban development. Applied ecology. Urban science*. 2017;3:5-25. <https://doi.org/10.15593/2409-5125/2017.03.01>. EDN: ZIAOHF.
27. Shubenkov M.V. Urban system and their role in the new conditions of social and economic development of the country. *Arkhitektura i stroitel'stvo Rossii = Architecture and Construction of Russia*. 2016;4:74-75. (In Russ.). EDN: XGYNDF.
28. Shishatsky N.G. The prospects of the Northern and Arctic territories and their development within the Yenisei Siberia megaproject. *Arktika i Sever = Arctic and North*. 2018;33:66-90. <https://doi.org/10.17238/issn2221-2698.33.66>. EDN: YTRNFZ.
29. Zamyatina N.Yu., Pilyasov A.N. The new theory of the arctic and northern development: multi-scale interdisciplinary synthesis. *Arktika i Sever = Arctic and North*. 2018;31:5-27. <https://doi.org/10.17238/issn2221-2698.2018.31.5>. EDN: UUCECI.
30. Anokhin A.A., Myakinenkov V.M. Main urban policy and functional planning zoning in the far North and Arctic. *Arktika. XXI vek. Gumanitarnye nauki = Arctic. XXI century. Humanitarian sciences*. 2015;3:21-32. (In Russ.). EDN: VPECZR.
31. Yakovleva S.I. Spatial models in the strategies of social and economic development of the Russian regions. Theoretical problems of regionology. *Pskovskii regionologicheskii zhurnal = Pskov Journal of Regional Studies*. 2014;17:3-16. (In Russ.). EDN: SJEHCJ.
32. Borodin V.A., Machin K.A., Lyubitskaya V.A., Erokhin A.V. Assessment of the potential for self-development of the regional economy and enhancing its effectiveness through integration of territories within the framework of the macro-regional agglomeration. *Voprosy regional'noi ekonomiki = Problems of regional economy*. 2017;3:18-25. (In Russ.). EDN: ZJSRLJ.
33. Treivish A.I. Geography of the Russian crises. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 1999;2:15-16. (In Russ.). EDN: MPCGKT.

Информация об авторах

Глебушкина Людмила Владимировна,
к.т.н., доцент кафедры
строительных конструкций,
Тюменский индустриальный университет,
625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, 2, Россия,
e-mail: glebushkinalyuda@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9826-2911>

Перетолчина Людмила Викторовна,
кандидат архитектуры,
доцент базовой кафедры строительного
материаловедения и технологий,
Братский государственный университет,
665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Россия,
e-mail: vladpert@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-6690-6858>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 31.01.2023.
Одобрена после рецензирования 24.02.2023.
Принята к публикации 27.02.2023.

Information about the authors

Lyudmila V. Glebushkina,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of the Department of Building Structures,
Industrial University of Tyumen,
2 Lunacharskogo St., Tyumen 625001, Russia,
e-mail: glebushkinalyuda@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9826-2911>

Lyudmila V. Peretolchina,
Cand. of Architecture,
Associate Professor of the Base Department
of Building Material Science and Technologies,
Bratsk State University,
40 Makarenko St., Bratsk 665709, Russia,
e-mail: vladpert@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-6690-6858>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 31.01.2023.
Approved after reviewing 24.02.2023.
Accepted for publication 27.02.2023.

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей, читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации.

Журнал «Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость» публикует научные статьи и обзоры российских и зарубежных ученых, в том числе докторантов и аспирантов, содержащие новые результаты научных исследований.

Тематический охват соответствует утвержденной номенклатуре научных специальностей:

- 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);
- 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);
- 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки);
- 2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов (технические науки);
- 2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки);
- 2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология (технические науки);
- 2.1.7. Технология и организация строительства (технические науки);
- 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки);
- 2.1.9. Строительная механика (технические науки);
- 2.1.10. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки);
- 2.1.11. Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура);
- 2.1.12. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура);
- 2.1.13. Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура)
- 2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства (технические науки)
- 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономические науки)
- 5.2.6. Менеджмент (экономические науки)

Представляемая в журнал работа должна быть законченным научным исследованием и содержать новые научные результаты, нигде ранее не публиковавшиеся и не представленные к публикации в других изданиях.

Статьи должны быть выполнены на высоком научном уровне и содержать результаты исследований по соответствующей проблематике. Рукопись, присылаемая в редакцию, должна соответствовать тематике журнала и требованиям редакции к оформлению рукописей.

1. Материалы, представляемые авторами в редакцию:

- Статья в печатном виде и идентичном варианте в электронной форме (с расширением *.doc и *.pdf);
- Иллюстрации к статье (рисунки, графики и т.д.) в электронном виде (в формате jpg);
- Авторское заявление;
- Сопроводительное письмо;
- Договор;
- Экспертное заключение.

2. Рукопись должна быть построена следующим образом:

- Шифр УДК;
- Название статьи;
- Информация об авторах: фамилия, имя, отчество; название учреждения;
- Реферат (аннотация) – количество слов – 200;
- Ключевые слова – (4–6);
- Библиографические ссылки должны быть соответственно оформлены:

1 вариант: Библиографический список – приводится русскоязычный вариант вместе с зарубежными источниками. Оформляется согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на электронные документы должны оформляться согласно ГОСТ 7.82-2001 «Библиографическая запись. Библиографическое описание электронных ресурсов». Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

2 вариант: *References* (для зарубежных баз данных) – приводится полностью отдельным блоком, повторяя список литературы к русскоязычной части, независимо от того, имеются или нет в нем иностранные источники. Если в списке есть ссылки на иностранные публикации, то они полностью повторяются в списке, готовящемся в романском алфавите.

В статье должны быть ссылки на иностранные источники, изданные не ранее, чем за последние 5 лет, свидетельствующие о том, что автором изучен вклад ученых разных стран в исследование проблемы.

- Критерии авторства, конфликт интересов;
- Сведения об авторах: фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень, звание и должность; название учреждения, его адрес с индексом; e-mail; ORCID.
- Название рубрики, в которой должна быть размещена статья.

3. Рекомендации по набору и оформлению текста

Параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 0,6 см; ориентация – книжная;

Шрифт – Arial, размер – 10, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический.

При вставке формул использовать *Microsoft Equation 3* при установках: элементы формулы выполняются – курсивом; для греческих букв и символов назначать шрифт Symbol, для остальных элементов – Arial.

Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул.

Рисунки, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 170 мм, высота 245 мм. Рисунки должны быть представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Схемы, графики выполняются во встроенной программе MS Word или в MS Excel, с приложением файлов.

Для построения графиков и диаграмм следует использовать программу *Microsoft Office Excel*. Каждый рисунок вставляется в текст как объект *Microsoft Office Excel*.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

Статьи направляются в редакцию журнала по электронной почте izv_isn@istu.edu. Рукописи статей и оригиналы всех необходимых документов предоставляются по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, редакционный отдел, ауд. Д-215, Никишиной О.В.

Телефон: (3952) 40-56-11, с.т.: 8 964 656 46 70 – Никишина Ольга Валерьевна, ответственный за выпуск,
(3952) 40-54-92– Акулова Ирина Николаевна, редактор.

**ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ
ИНВЕСТИЦИИ. СТРОИТЕЛЬСТВО. НЕДВИЖИМОСТЬ**

Научный журнал

12+

Том 13 № 2 (45)

Главный редактор В.В. Пешков
Ответственный за выпуск О.В. Никишина
Дизайн и макет издания Е.В. Хохрина
Перевод Томаса Бивитта, Н.Г. Поповой, О.В. Никишиной
Верстка О.В. Никишиной
Редактор И.Н. Акулова

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций (Роскомнадзор)
Свидетельство ПИ № ФС77-62787 от 18 августа 2015 г.

Выход в свет 30.06.2023. Формат 60 x 90 / 8 (А4).
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 27,50.
Тираж 500 экз. Зак. 62. Поз. плана бн.

Издание распространяется бесплатно

ФГБОУ ВО "Иркутский национальный исследовательский технический университет"
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО "Иркутский национальный исследовательский технический университет"
Адрес типографии: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83А



ВЫСШАЯ
АТТЕСТАЦИОННАЯ КОМИССИЯ (ВАК)
Министерства образования и науки Российской Федерации



РОССИЙСКИЙ ИНДЕКС
НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ
Science Index



CYBERLENINKA

OPEN  ACCESS



INDEX  COPERNICUS
INTERNATIONAL

Google Scholar



АНРИ

Ассоциация научных
редакторов и издателей

