



## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ляхович Л.С., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, профессор кафедры строительной механики ТГАСУ, г. Томск; [lls@tsuab.ru](mailto:lls@tsuab.ru)  
Акимов П.А., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, ректор МГСУ, г. Москва; [pavel.akimov@gmail.com](mailto:pavel.akimov@gmail.com)  
Белостоцкий А.М., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, ген. директор научно-исследовательского центра СтаДиО, г. Москва; [amb@stadyo.ru](mailto:amb@stadyo.ru)  
Беккер А.Т., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, научный руководитель политехнического института ДВФУ, г. Владивосток; [bekker.at@dvfu.ru](mailto:bekker.at@dvfu.ru)  
Бондаренко И.А., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, директор НИИТИАГ, филиал ЦНИИП Минстроя России, г. Москва; [nititag@yandex.ru](mailto:nititag@yandex.ru)  
Власов В.А., докт. физ.-мат. наук, профессор, советник РААСН, ректор ТГАСУ, г. Томск; [rector@tsuab.ru](mailto:rector@tsuab.ru)  
Волокитин Г.Г., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой прикладной механики и материаловедения ТГАСУ, г. Томск; [vgg-tomsk@mail.ru](mailto:vgg-tomsk@mail.ru)  
Волокитин О.Г., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, проректор по учебной работе ТГАСУ, г. Томск; [study@tsuab.ru](mailto:study@tsuab.ru)  
Галяутдинов З.Р., докт. техн. наук, доцент, зав. кафедрой железобетонных конструкций ТГАСУ, г. Томск; [zgaryautdinov@tsuab.ru](mailto:zgaryautdinov@tsuab.ru)  
Гныря А.И., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, профессор кафедры технологии строительного производства ТГАСУ, г. Томск; [tsp\\_tgasu@mail.ru](mailto:tsp_tgasu@mail.ru)  
Детярев В.В., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, зав. кафедрой гидротехнического строительства, безопасности и экологии НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск; [ngasu\\_gts@mail.ru](mailto:ngasu_gts@mail.ru)  
Есаулов Г.В., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, проректор по научной работе МАРХИ, г. Москва; [gvesaulov@raasn.ru](mailto:gvesaulov@raasn.ru)  
Ефименко В.Н., докт. техн. наук, профессор кафедры автомобильных дорог ТГАСУ, г. Томск; [svefimenko\\_80@mail.ru](mailto:svefimenko_80@mail.ru)  
Ефименко С.В., докт. техн. наук, проректор по научной работе ТГАСУ, г. Томск; [svefimenko@tsuab.ru](mailto:svefimenko@tsuab.ru)  
Зайченко Н.М., докт. техн. наук, профессор, ректор ДонНАСА, г. Макеевка; [mailbox@donnasa.ru](mailto:mailbox@donnasa.ru)  
Ильичев В.А., докт. техн. наук, профессор, вице-президент РААСН, академик РААСН, г. Москва; [ilyichev@raasn.ru](mailto:ilyichev@raasn.ru)  
Каприелов С.С., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, зав. лабораторией НИИЖБ, г. Москва; [kaprielov@masterbeton-mb.ru](mailto:kaprielov@masterbeton-mb.ru)  
Копаница Н.О., докт. техн. наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, г. Томск; [kopanitsa@mail.ru](mailto:kopanitsa@mail.ru)  
Кудяков А.И., докт. техн. наук, советник РААСН, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, г. Томск; [kudyakov@tsuab.ru](mailto:kudyakov@tsuab.ru)  
Кумпьяк О.Г., докт. техн. наук, советник РААСН, профессор кафедры железобетонных конструкций ТГАСУ, г. Томск; [kumpyak@yandex.ru](mailto:kumpyak@yandex.ru)  
Лотов В.А., докт. техн. наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, г. Томск; [valotov@tpu.ru](mailto:valotov@tpu.ru)  
Люсия Тсантилис, доцент кафедры охраны окружающей среды, земельных ресурсов и организации инфраструктуры Туринского политехнического университета, г. Турин, Италия; [lucia.tsanilis@polito.it](mailto:lucia.tsanilis@polito.it)  
Морозов В.И., докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, зав. кафедрой строительных конструкций СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург; [morozov@spbgasu.ru](mailto:morozov@spbgasu.ru)  
Овсянников С.Н., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой архитектуры гражданских и промышленных зданий ТГАСУ, советник РААСН, г. Томск; [ovssn@tsuab.ru](mailto:ovssn@tsuab.ru)  
Орозбеков М.О., докт. техн. наук, профессор ОмГУ, г. Омь, Кыргызская Республика; [oshsu@mail.ru](mailto:oshsu@mail.ru)  
Поляков Е.Н., докт. искусствоведения, канд. архитектуры, профессор кафедры теории и истории архитектуры ТГАСУ, член Союза архитекторов России, г. Томск; [polyakov-en@ya.ru](mailto:polyakov-en@ya.ru)  
Ситникова Е.В., канд. архитектуры, доцент кафедры реставрации и реконструкции архитектурного наследия ТГАСУ, г. Томск; [elensi@vtomske.ru](mailto:elensi@vtomske.ru)  
Сколубович Ю.Л., докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, ректор НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск; [sjl1964@mail.ru](mailto:sjl1964@mail.ru)  
Тептаев Б.Б., докт. техн. наук, профессор, академик Национальной инженерной академии РК и Международной академии транспорта, г. Алматы, Республика Казахстан; [bagdabt@yahoo.com](mailto:bagdabt@yahoo.com)  
Травуш В.И., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, вице-президент РААСН, г. Москва; [travush@mail.ru](mailto:travush@mail.ru)  
Цветков Н.А., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой теплогазоснабжения ТГАСУ, г. Томск; [nac@tsuab.ru](mailto:nac@tsuab.ru)  
Шубенков М.В., докт. архитектуры, профессор, вице-президент РААСН, зав. кафедрой градостроительства МАРХИ, г. Москва; [shubenkov@gmail.com](mailto:shubenkov@gmail.com)  
Шубин И.Л., докт. техн. наук, чл.-корр. РААСН, директор НИИСФ РААСН, г. Москва; [niisf@niisf.ru](mailto:niisf@niisf.ru)  
Чулин В.Р., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, зав. кафедрой городского строительства и хозяйства ИНИТУ, г. Иркутск; [chupinvr@ex.istu.edu](mailto:chupinvr@ex.istu.edu)

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ

Журнал «Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета» (подписной индекс 20424) включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по строительству и архитектуре, утвержденный решением Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 17.06.2011 г.

Электронные версии журнала «Вестник ТГАСУ» представлены на сайтах «Научная электронная библиотека»: [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru); «Российская книжная палата»: <https://online.bookchamber.ru/book/ru/>; «Российская государственная библиотека»: <https://www.rsl.ru/>; «Томская областная универсальная научная библиотека имени А.С. Пушкина»: <https://www.lib.tomsk.ru/>; «EBSCO»: <https://www.ebsco.com>; «КиберЛенинка»: <https://cyberleninka.ru/>; «IPRbooks»: [www.iprbookshop.ru](http://www.iprbookshop.ru), а также на сайте «Вестник ТГАСУ»: <https://vestnik.tsuab.ru>

Научное издание

ВЕСТНИК ТГАСУ № 2 – 2024

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)

ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций ПИ №77-9483 от 30 июля 2001 г.  
Журнал перерегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) ПИ № ФС77-81849 от 24 сентября 2021 г.

Учредитель: ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Редакторы Т.С. Володина, В.Н. Коршунова, Е.А. Кулешова, Переводчик М.В. Воробьева, Дизайнер Е.И. Кардаш.

Технический редактор Н.В. Удлер.

Подписано в печать 22.04.2024. Формат 70×108/16. Гарнитура Таймс.

Дата выхода: 27.04.2024.

Уч.-изд. л. 16,06. Усл. печ. л. 19,08. Тираж 200 экз. Заказ № 32.

Цена: свободная.

Адрес редакции/издателя: 634003, Томск, пл. Соляная, 2, тел. (3822) 65-37-61, e-mail: [vestnik\\_tgasu@tsuab.ru](mailto:vestnik_tgasu@tsuab.ru)  
Отпечатано в ООП ТГАСУ, Томск, ул. Партизанская, 15



© Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2024



## EDITORIAL STAFF

Lyakhovich L.S., DSc, Professor, RAACS Academician, Structural Mechanics Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [lls@tsuab.ru](mailto:lls@tsuab.ru)  
Akimov P.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS, Rector, MGSU, Moscow, Russia; [pavel.akimov@gmail.com](mailto:pavel.akimov@gmail.com)  
Belostotskii A.M., DSc, Professor, RAACS Academician, Director General Research Center StaDIO, Moscow, Russia; [amb@stadyo.ru](mailto:amb@stadyo.ru)  
Bekker A.T., DSc, Professor, RAACS Academician, Academic Adviser, Polytechnic Institute of Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia; [be-ker.at@dfyu.ru](mailto:be-ker.at@dfyu.ru)  
Bondarenko I.A., DSc, Professor, RAACS Academician, Director Scientific Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Planning, Branch of the Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, Moscow, Russia; [niitag@yandex.ru](mailto:niitag@yandex.ru)  
Chupin V.R., DSc, Professor, Head of Urban Planning and Economy Dept., National Research Irkutsk State Technical University, Irkutsk, Russia; [chupinvr@ex.istu.edu](mailto:chupinvr@ex.istu.edu)  
Degtyarev V.V., DSc, Professor, RAACS Adviser, Head of Hydraulic Engineering, Safety and Ecology Dept., Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia; [ngasu\\_gts@mail.ru](mailto:ngasu_gts@mail.ru)  
Efimenko V.N., DSc, Professor, Automobile Roads Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [svefimenko\\_80@mail.ru](mailto:svefimenko_80@mail.ru)  
Efimenko S.V., DSc, Vice-Rector for Research, TSUAB, Tomsk, Russia; [svefimenko@tsuab.ru](mailto:svefimenko@tsuab.ru)  
Esaulov G.V., DSc, Professor, RAACS Academician, Vice-Rector for Research of Moscow Architectural Institute (State Academy), Moscow, Russia; [esaulovgv@raasn.ru](mailto:esaulovgv@raasn.ru)  
Galyautdinov Z.R., DSc, A/Professor, Head of Reinforced Concrete Construction Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [zgalyautdinov@tsuab.ru](mailto:zgalyautdinov@tsuab.ru)  
Gnyrya A.I., DSc, Professor, RAACS Adviser, Construction Engineering Technology Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [tsp\\_tgasu@mail.ru](mailto:tsp_tgasu@mail.ru)  
Il'ichev V.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Vice President, Moscow, Russia; [ilyichev@raasn.ru](mailto:ilyichev@raasn.ru)  
Kaprielov S.S., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Head of Laboratory at Gvozdev Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete, Moscow, Russia; [kaprielov@masterbeton-mb.ru](mailto:kaprielov@masterbeton-mb.ru)  
Kopanitsa N.O., DSc, Professor, Building Materials and Technologies, TSUAB, Tomsk, Russia; [kopanitsa@mail.ru](mailto:kopanitsa@mail.ru)  
Kudyakov A.I., DSc, Professor, RAACS Adviser, Head of Construction Engineering Technology Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [kudyakov@tsuab.ru](mailto:kudyakov@tsuab.ru)  
Kumpyak O.G., DSc, Professor, RAACS Adviser, Reinforced Concrete and Masonry Structures Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [kumpyak@yandex.ru](mailto:kumpyak@yandex.ru)  
Lotov V.A., DSc, Professor, Construction Engineering Technology Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [valotov@tpu.ru](mailto:valotov@tpu.ru)  
Morozov V.I., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Head of Engineering Constructions Dept., SPSUACE, Saint-Petersburg, Russia; [morozov@spbgasu.ru](mailto:morozov@spbgasu.ru)  
Orozbekov M.O., DSc, Professor, Rector, Osh State University, Osh, Kyrgyz Republic; [oshsu@mail.ru](mailto:oshsu@mail.ru)  
Ovsyannikov S.N., DSc, Professor, RAACS Adviser, Head of Architecture of Civil and Industrial Buildings Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [ovssn@tsuab.ru](mailto:ovssn@tsuab.ru)  
Polyakov E.N., DArts, Professor, Member of the Union of Architects of Russia; Theory and History of Architecture Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [polyakov-en@ya.ru](mailto:polyakov-en@ya.ru)  
Skolubovich Yu.L., DSc, Professor, RAACS Correspondent Member, Rector, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia; [sjl1964@mail.ru](mailto:sjl1964@mail.ru)  
Sitnikova E.V., DArts, A/Professor, Restoration and Renovation of Architectural Heritage Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [elensi@vtomske.ru](mailto:elensi@vtomske.ru)  
Shubnikov M.V., DArts, Professor, Head of Urban Planning Dept., Moscow Architectural Institute (State Academy), RAACS Vice President, Moscow, Russia; [shubnikov@gmail.com](mailto:shubnikov@gmail.com)  
Shubin I.L., DSc, RAACS Corresponding Member, Director Structural Physics Research Institute, RAACS, Moscow, Russia; [niisf@niisf.ru](mailto:niisf@niisf.ru)  
Teltaev B.B., DSc, Professor, Academician, National Academy of Engineering of Kazakhstan and International Academy of Transport, Almaty, Kazakhstan; [bagdatbi@yahoo.com](mailto:bagdatbi@yahoo.com)  
Travush V.I., DSc, Professor, RAACS Vice President, RAACS Academician, Moscow, Russia; [travush@mail.ru](mailto:travush@mail.ru)  
Tsantilis L., A/Professor, Environment, Land and Infrastructure Engineering Dept., Polytechnic University of Turin, Turin, Italy; [luca.tsantilis@polito.it](mailto:luca.tsantilis@polito.it)  
Tsvetkov N.A., DSc, Professor, Head of Heat and Gas Supply Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [nac@tsuab.ru](mailto:nac@tsuab.ru)  
Vlasov V.A., DSc, Professor, RAACS Adviser, Rector, TSUAB, Tomsk, Russia; [rector@tsuab.ru](mailto:rector@tsuab.ru)  
Volokitin G.G., DSc, Professor, Head of Applied Mechanics and Materials Science Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [vgg-tomsk@mail.ru](mailto:vgg-tomsk@mail.ru)  
Volokitin O.G., DSc, Professor, RAACS Adviser, Vice-Rector for Academic Affairs, TSUAB, Tomsk, Russia; [study@tsuab.ru](mailto:study@tsuab.ru)  
Zaichenko N.M., DSc, Professor, Rector, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka, Russia; [mailbox@donnasa.ru](mailto:mailbox@donnasa.ru)

## INFORMATION FOR AUTHORS AND READERS

Journal «Journal of Construction and Architecture» is included in the list of the peer reviewed scientific journals and editions published in the Russian Federation. The main results of PhD and DSc theses obtained in construction and architectural field studies should be published in this journal. The journal was approved by the decision of the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Science and Higher Education.

Decision of the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of Russia,  
17 June, 2011

The electronic version of the journal is available at [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru); <https://online.bookchamber.ru/book/ru/>; <https://www.rsl.ru/>; <https://www.lib.tomsk.ru/>; <https://www.ebsco.com>; <https://cyberleninka.ru>; [www.iprbookshop.ru](http://www.iprbookshop.ru); <https://vestnik.tsuab.ru>

Scientific Edition  
VESTNIK TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO ARHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA  
JOURNAL OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE No 2 – 2024  
Print ISSN 1607-1859 Online ISSN 2310-0044

The journal is registered by the Federal Agency on Press and Mass Communications of the Russian Federation PI N77-9483, 30 July, 2001.  
The journal is re-registered by the Federal Supervision Service for Communication, Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor)  
PI N FS77-81849, September 24, 2021.

Founder: Tomsk State University of Architecture and Building

Editors T.S. Volodina, V.N. Korshunova, E.A. Kuleshova. Translator M.V. Vorob'eva. Design: E.I. Kardash. Technical editor N.V. Udler  
Passed for printing: 22.04.2024. Paper size: 70×108/16. Typeface: Times New Roman Issue date: 27.04.2024.  
Published sheets: 16,06. Conventional printed sheets: 19,08. Print run: 200 copies Price: free.  
Order N 32.

Editorial address: 2, Solyanaya Sq., Tomsk, 634003  
Phone: +7 (3822) 653-761; E-mail: [vestnik\\_tgasu@tsuab.ru](mailto:vestnik_tgasu@tsuab.ru)  
TSUAB Printing House, 15, Partizanskaya Str., Tomsk, 634003



© Tomsk State University  
of Architecture and Building, 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

### АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

<b>Поляков Е.Н., Полякова О.П.</b> «Пуристическое» направление в творчестве Шарля-Эдуарда Жаннере-Гри (Ле Корбюзье) .....	9
<b>Архангельская И.В., Фурман Н.В.</b> Влияние природного ландшафта на формирование визуального образа исторического города на примере Саратова.....	26
<b>Ремарчук С.М.</b> Анализ современных подходов к проектированию арктических городов.....	36
<b>Огиенко Е.Л.</b> Экономически доступное жилище в Европе, Америке и России в V–XVIII вв. ....	48
<b>Негуляева Т.В., Дудина Е.С., Майскова М.Д.</b> Региональные особенности колористики классицизма в Саратове.....	61

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

<b>Коянкин А.А.</b> О развитии расчётов конструкций, усиливаемых методом параллельного элемента.....	69
<b>Курасов О.А., Бурков П.В.</b> Оценка заданного уровня надёжности сложных технических систем на основе критериев приемлемости риска.....	80
<b>Курасов О.А., Бурков П.В.</b> Системный анализ конкурирующих рисков отказа технических систем на основе непараметрического прогнозирования .....	93
<b>Подшивалов И.И.</b> Анализ несущей способности и устойчивости железобетонного безригельного каркаса экспериментального здания на различной стадии его работы.....	104
<b>Токарчук В.В., Цимбельман Н.Я.</b> Концепция смешанного решения регулирования напряженно-деформированного состояния большепролётных конструкций .....	113
<b>Тишков Н.Л., Фомина А.С.</b> Анализ напряженно-деформированного состояния стальных гофрированных двутавровых балок, предварительно напряженных вытяжкой нижнего пояса .....	123

### ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

<b>Поливанов Д.Е.</b> Метод моделирования продолжительности и частоты водопотребления различными водоразборными устройствами .....	132
--	-----

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

<b>Аниканова Л.А.</b> Особенности применения вторичного ангидритового сырья для производства керамических материалов .....	148
<b>Цветков Н.А., Толстых А.В., Копаница Н.О., Цветков Д.Н., Дорошенко Ю.Н., Горкольева Д.С.</b> Теплозащитные свойства профилированного деревянного бруса с торфовермикулитовым утеплителем .....	157
<b>Вакалова Т.В., Сергеев Н.П., Толегенов Д.Т., Толегенова Д.Ж., Митина Н.А.</b> Перспективы использования красного шлама для получения высокопрочной строительной керамики .....	171
<b>Аниканова Л.А.</b> Силикатные автоклавные материалы с использованием вторичного ангидритового сырья.....	185

## СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

<b>Устинов А.М., Клопотов А.А., Пляскин А.С., Волокитин Г.Г.</b> Эволюция полей напряжений на поверхности муфтового соединения арматурных стержней при одноосной деформации растяжением .....	194
<b>Гребенюк Г.И., Вешкин М.С., Максак В.И., Жилина Д.А.</b> Особенности расчета линейно-упругих стержневых систем при периодических импульсных воздействиях.....	204

## C O N T E N T S

### ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

<b>Polyakov E.N., Polyakova O.P.</b> Purism in creative activity of Jeanneret-Gree (Le Corbusier).....	9
<b>Arkhangel'skaya I.V., Furman N.V.</b> Natural landscape in the formation of historical city Saratov .....	26
<b>Remarchuk S.M.</b> The analysis of novel approaches to Arctic cities design .....	36
<b>Ogienko E.L.</b> Affordable housing in Russia, Europe and USA in the 5–18th centuries .....	48
<b>Negulyaeva T.V., Dudina E.S., Maiskova M.D.</b> Classicism in the Saratov region .....	61

### BUILDING AND CONSTRUCTION

<b>Koyankin A.A.</b> Parallel FEM for structural analysis of reinforced systems .....	69
<b>Kurasov O.A., Burkov P.V.</b> Evaluation of reliability of complex engineering systems using risk acceptance criteria .....	80
<b>Kurasov O.A., Burkov P.V.</b> Competing risks analysis of engineering system failure based on nonparametric prediction .....	93
<b>Podshivalov I.I.</b> Bearing capacity and stability of reinforced concrete composite frame without collar beams at different operating stages .....	104
<b>Tokarchuk V.V., Tsimbel'man N.Ya.</b> Concept of combined strain-stress state control of long span structures .....	113
<b>Tishkov N.L., Fomina A.S.</b> Stress-strain state of steel corrugated I-beams prestressed by flange drawing.....	123

### WATER SUPPLY, SEWERAGE, BUILDING SYSTEMS OF WATER RESOURCE PROTECTION

<b>Polivanov D.E.</b> Mathematical simulation of duration and frequency of water consumption by various water dispensers.....	132
---	-----

## CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

<b>Anikanova L.A.</b> Acid fluoride in ceramic material production .....	148
<b>Tsvetkov N.A., Tolstykh A.V., Kopanitsa N.O., Tsvetkov D.N., Doroshenko Yu.N., Gorkol'tseva D.S.</b> Thermal protection properties of profiled timber with peat-vermiculite insulation .....	157
<b>Vakalova T.V., Sergeev N.P., Tolegenov D.T., Tolegenova D.Zh., Mitina N.A.</b> Red mud in high-strength ceramics production .....	171
<b>Anikanova L.A.</b> Silicate brick production using anhydrite raw material .....	185

## STRUCTURAL MECHANICS

<b>Ustinov A.M., Klopotov A.A., Plyaskin A.S., Volokitin G.G.</b> Stress field evolution on rebar coupling connection at uniaxial tension.....	194
<b>Grebenyuk G.I., Veshkin M.S., Maksak V.I., Zhilina D.A.</b> Strength analysis of linear-elastic frame structures under pulse-periodic loads.....	204

# АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

## ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 2. С. 9–25.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (2): 9–25.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

### НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.036

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-9-25

EDN: AGFRDQ

### «ПУРИСТИЧЕСКОЕ» НАПРАВЛЕНИЕ В ТВОРЧЕСТВЕ ШАРЛЯ-ЭДУАРДА ЖАННЕРЕ-ГРИ (ЛЕ КОРБЮЗЬЕ)

**Евгений Николаевич Поляков, Ольга Павловна Полякова**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия*

**Аннотация.** Статья посвящена пуризму (лат. *purus* – «чистый, строгий», фр. *purisme*) – второму творческому направлению в проектной и общественной деятельности выдающегося французского зодчего Ш.-Э. Жаннере-Гри (Ле Корбюзье, 1887–1965). Это одно из наиболее популярных течений в модернистской живописи и архитектуре начала XX столетия.

Рассмотрены отличительные особенности данного стиля. Наиболее яркие элементы французского пуризма были впервые апробированы в проекте виллы швейцарского бизнесмена и коллекционера картин Рауля Альберта Ла Роша (1925–1928 гг.).

**Ключевые слова:** Франция, Париж, Ш.-Э. Жаннере-Гри (Ле Корбюзье), стиль пуризм, вилла Рауля Ла Роша/Жаннере в квартале Отёй, картинная галерея виллы Рауля Ла Роша/Жаннере

**Для цитирования:** Поляков Е.Н., Полякова О.П. «Пуристическое» направление в творчестве Шарля-Эдуарда Жаннере-Гри (Ле Корбюзье) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 9–25. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-9-25. EDN: AGFRDQ

## ORIGINAL ARTICLE

**PURISM IN CREATIVE ACTIVITY OF JEANNERET-GREE (LE CORBUSIER)****Evgenii N. Polyakov, Ol'ga P. Polyakova***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

**Abstract.** The paper is devoted to purism (Latin *purus* – "pure, strict"), the second creative direction in the design and social activity of S.-E. Jeanneret-Gree (Le Corbusier, 1887–1965), the outstanding French architect. It is one of the most popular trends in modern painting and architecture in the early 20th century.

The paper considers this style in detail. The most striking elements of French purism were firstly tested in the design of the villa belonged to Raul Albert La Roche (1925–1928), a Swiss businessman and collector of paintings.

**Keywords:** France, Paris, Jeanneret-Gry (Le Corbusier), purism, villa of Raoul La Roche/Jeanerret, picture gallery

**For citation:** Polyakov E.N., Polyakova O.P. Purism in creative activity of Jeanneret-Gree (Le Corbusier). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (2): 9–25. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-9-25. EDN: AGFRDQ

В конце 1916 г. подающий большие надежды молодой зодчий Шарль-Эдуард Жаннере-Гри переехал в Париж, чтобы навсегда в нем обосноваться.

В Париже Корбюзье проявил себя не только как архитектор, но и как талантливый скульптор и график. Параллельно Шарль-Эдуард преподавал рисование в детской художественной студии. Все свободное время он посвящал занятиям живописью и теорией искусства, причем живопись стала его любимым занятием на протяжении всей жизни. В шутку он говаривал: «Архитектура – это моя жена, а живопись – любовница!..» (рис. 1).

Основные идеи пуризма были обозначены французским художником Амеде Озанфаном и Шарлем-Эдуардом Жаннере в 1918 г. в манифесте «После кубизма», в котором были сформулированы базисные положения нового течения в живописи того времени. Они призывали к «очищению действительности» от случайностей и несовершенных форм ради создания «идеальных зрительных конструкций», которые должны стать «эквивалентом» мыслимого совершенного мира. Амеде и Шарль писали натюрморты, выискивая чистоту линий, силуэтов и неярких гармоничных цветов, тем самым уподобляя живопись графике. Они упрощали, делая плоской, форму предметов ради создания «чистой архитектоники», основанной на игре линий и рифмованных силуэтов, «очищенных» от случайных, несущественных деталей: «Пуризм – интеллектуальное искусство, что исключает случайность и говорит с помощью чёткой геометрии форм. Украшения архитектор воспринимает как нечто поверхностное, то, что занимает место. Пуризм – это лаконичная действительность, очищенная от кожур украшений и декоративности...»<sup>1</sup> (рис. 2).

<sup>1</sup> Архитектор Ле Корбюзье. URL: <https://vk.com/wall-94368195-1192?ysclid=lto8266op4842079934>



Рис. 1. Жена Ле Корбюзье Ивонн Галли (Галлис), фото 1957 г. (слева); её портрет, выполненный Шарлем-Эдуардом (справа)<sup>2</sup>

Fig. 1. Le Corbusier's wife Yvonne Galli (Gallis), 1957 (left) And her portrait by Charles-Edouard (right)

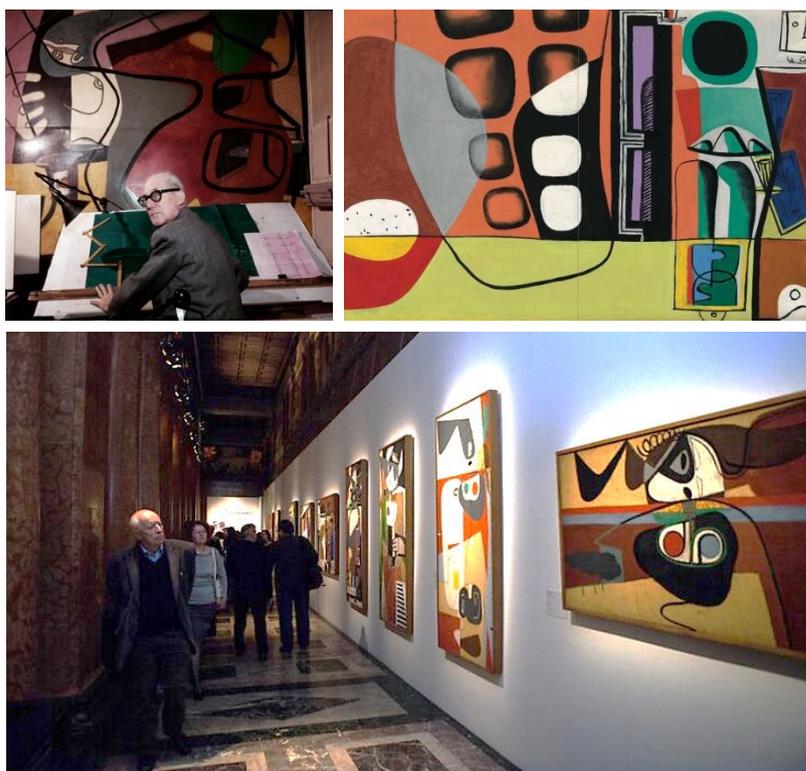


Рис. 2. Выставка живописных работ Ле Корбюзье в ГМИИ им. Пушкина [1]

Fig. 2. Exhibition of Le Corbusier's paintings at the Pushkin State Museum of Fine Arts [1]

<sup>2</sup> URL: <https://mahno.com.ua/blog/post/le-corbusier>

Позднее Ле Корбюзье написал следующее: «Геометрическое начало будет все сильнее проникать в сферу искусства, в сферу живописи; живопись, которую до сих пор считали нормальной, допустимой, то есть живопись подражательная, не сможет господствовать единолично. На ее место придет целый набор новых пластических явлений, которые, с одной стороны, лишат её того интереса, какой она могла вызывать с изобразительной точки зрения – я имею в виду кино и фотографию, которые уже поглощают всё, что есть любопытного в области изображения, – и которые, с другой стороны, приведут к тому, что она сможет существовать лишь за счёт соотношений красок, объёмов, линий, а следовательно, за счёт пропорции и присущих ей свойств математического характера. И разумеется, за счёт необходимой чувственно осязаемой связи с окружающей нас средой...» [2, с. 34].

В 1919–1925 гг., получив финансовую поддержку от банкира Рауля Ла Роша, Амеде и Шарль-Эдуард начали издавать философско-художественный журнал «Эспри Нуво» (*франц.* Esprit Nouveau – «Новый Дух»), на страницах которого Жаннере стал публиковаться под псевдонимом Ле Корбюзье (фамилия одного из предков его матери).

В 1922 г. Шарль-Эдуард покинул Альфортвилльский завод. Вместе со своим двоюродным братом (кузеном) Пьером Жаннере (Pierre Jeanneret) он открыл собственное архитектурное бюро (рис. 3).

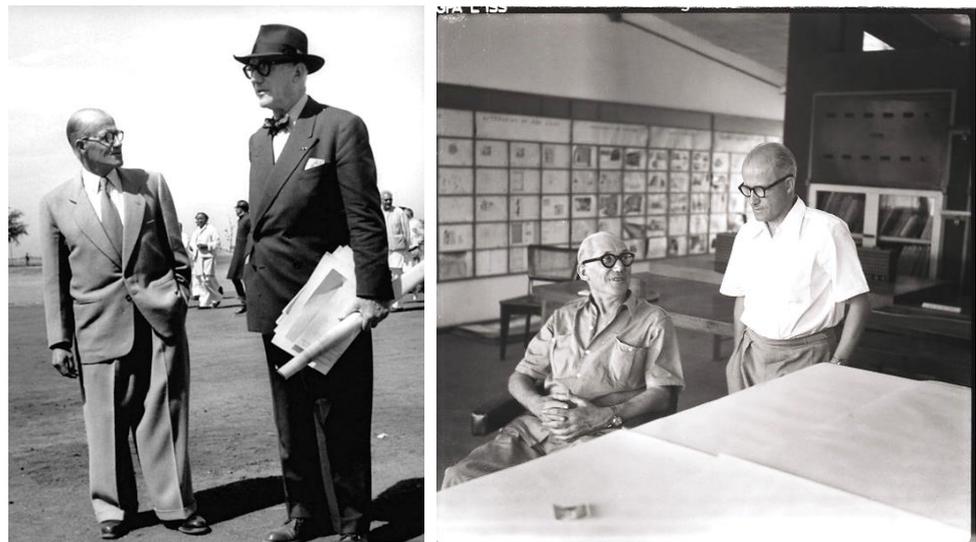


Рис. 3. Пьер и Шарль-Эдуард Жаннере – основатели проектной мастерской на ул. Де Севр, 35<sup>3</sup>  
Fig. 3. Pierre and Charles-Edouard Jeanneret, founders of the design workshop at 35 rue de Sèvres

В 1924 г. братья арендовали под свой офис крыло старого парижского монастыря по адресу ул. Де Севр, 35 (rue de Sevre, 35) (рис. 4). Здесь постоянно работала большая группа сотрудников Ле Корбюзье и было создано большинство его уникальных проектов жилых зданий.

<sup>3</sup> URL: <https://yandex.ru/image&text=пьер%20жаннере%20и%20ле%20корбюзье>

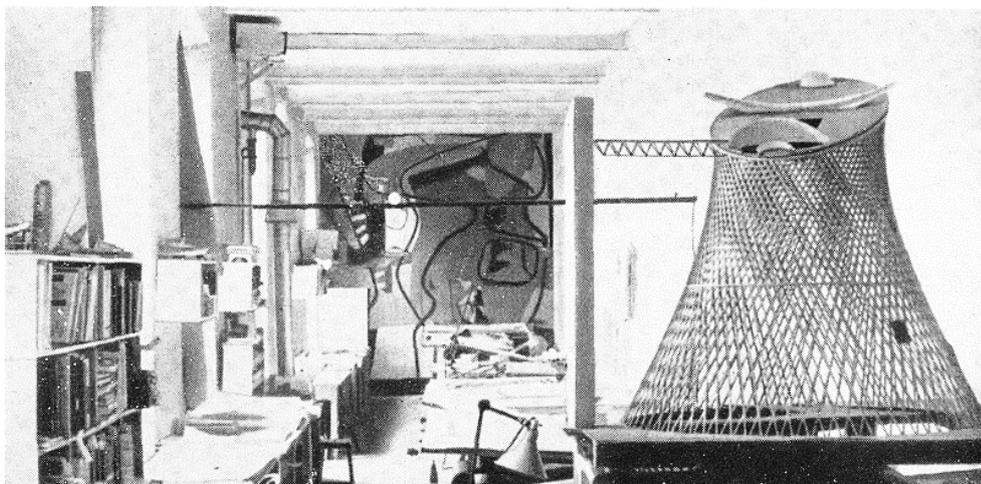


Рис. 4. Мастерская Ле Корбюзье в Париже на ул. Де Севр, 35 [3]  
Fig. 4. Le Corbusier's workshop in Paris at 35 rue de Sèvres [3]

В 1920-е гг. в этом бюро были созданы проекты нескольких модернистских вилл. Наиболее известные из них возведены в Париже и его окрестностях. Это футуристический особняк Villas La Roche-Jeanneret (1923–1925 гг.) в квартале Отёй (западный район Парижа), вилла Штейн в Гарш (совр. Вокресон, 1927 г.) и вилла Савой в Пуасси (1929 г.). В этой статье мы рассмотрим только первую из указанных выше вилл.

После завершения дома-студии Амеде Озанфана [3] Villas La Roche-Jeanneret стала новым этапом в творческом развитии Ле Корбюзье (рис. 5).



Рис. 5. Villa La Roche/Villa Jeanneret, Париж, 1923–1925 гг.<sup>4</sup>  
Fig. 5. Villa La Roche/Villa Jeanneret, Paris, 1923–1925

Приехав в 1918 г. из швейцарского городка Базеля в Париж, Рауль Альберт Ла Рош познакомился с Амеде Озанфаном и Ле Корбюзье. Гости заинтересовали новейшие тенденции и стили в европейской живописи (кубизм, пу-

<sup>4</sup> URL: <https://mebel169.ru/articles/geniy-arhitektury-le-korbyuze/?ysclid=lo1frx42kz997553392>

ризм и др.), в том числе и картины его собеседников, которые банкир-коллекционер вскоре начал активно скупать. Для их экспонирования он организовал за свой счёт несколько выставок, а в 1923 г. попросил Шарля-Эдуарда построить ему в «элитном» квартале Отёй, расположенном на западной окраине Парижа, жилой особняк Maison La Roche с картинной галереей. В этой галерее он предполагал разместить уже собранную коллекцию картин, включавшую работы Х. Грися, Ф. Леже, П. Пикассо, А. Озанфана, Ле Корбюзье и многих других выдающихся художников-пуристов (рис. 6).

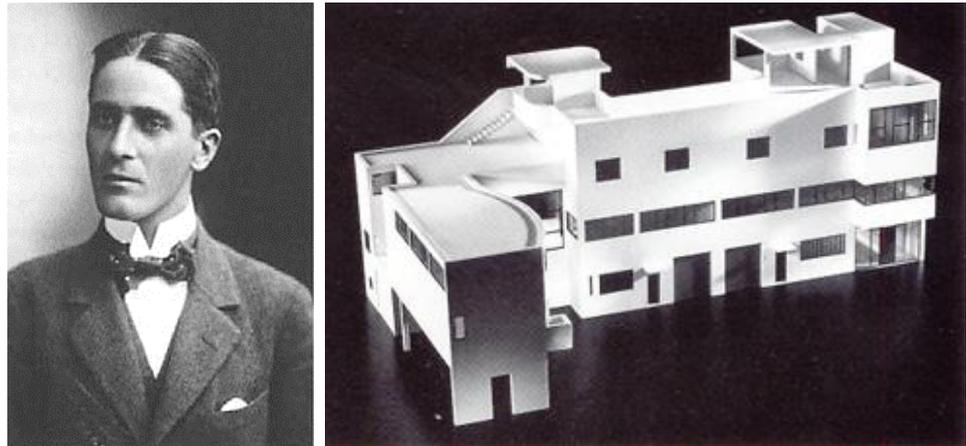


Рис. 6. Рауль Альберт Ла Рош (23 февраля 1889 г. – 15 июня 1965 г.) – швейцарский банкир, меценат и коллекционер произведений искусства (слева); макет его особняка с картинной галереей в квартале Отёй (справа)<sup>5</sup>

Fig. 6. Raoul Albert La Roche (23 February 1889 – 15 June 1965), a Swiss banker, patron of the arts and art collector (left); model of his mansion with art gallery in the Oteuil quarter (right)

Как было отмечено выше, местом строительства Maison La Roche стал пригород Отёй (Auteuil). В начале прошлого столетия это был самостоятельный город, а в настоящее время он стал частью XVI округа Парижа. Изначально предполагалось, что здесь будет построена целая «улица вилл» для представителей финансовой и интеллектуальной элиты. Каждая вилла была рассчитана на две семьи. Строить эту улицу взялся Ле Корбюзье. Для финансирования проекта было создано акционерное общество, а сама улица должна была продемонстрировать возможности новых архитектурных стилей (пуризма, модернизма). Однако данный градостроительный замысел так и не был реализован. Была построена всего лишь одна «двойная» вилла (Maison La Roche), но благодаря именно ей пуризм окончательно оформился в качестве самостоятельного архитектурного стиля.

Maison La Roche включает две сблокированные трёхэтажные виллы, завершённые в марте 1925 г. Относительно главного входа в жилую часть виллы апартаменты Рауля Ла Роша находятся слева, а Альберта Жаннере – справа (рис. 7).

<sup>5</sup> URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Raoul\\_Albert\\_La\\_Roche](https://en.wikipedia.org/wiki/Raoul_Albert_La_Roche)

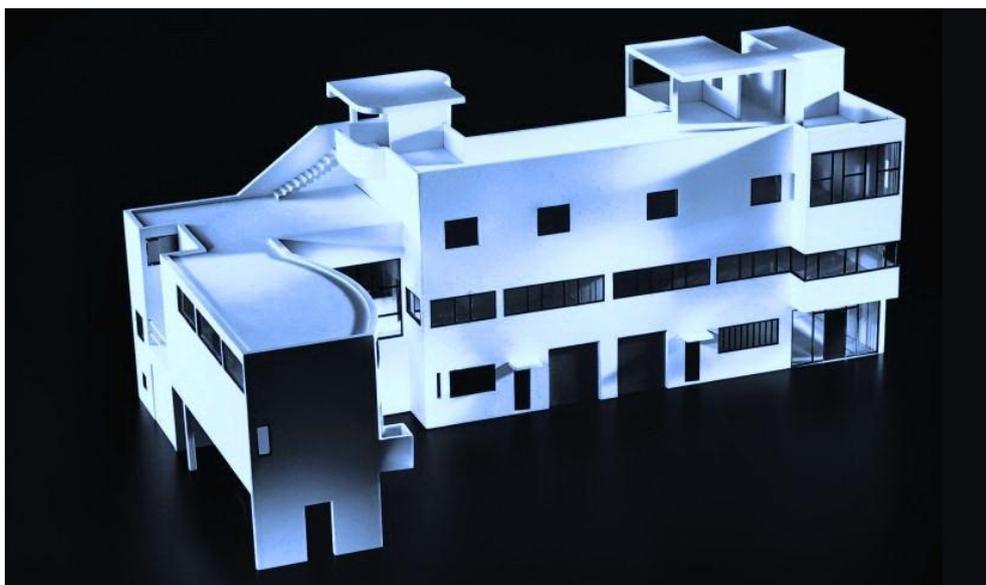


Рис. 7. Макет Maison La Roche<sup>6</sup>  
Fig. 7. Three-dimensional view of Maison La Roche

Жилые апартаменты Рауля начинаются с большого парадного холла (рис. 8, *левая часть*). Справа от него расположена жилая часть дома с горизонтальными окнами и изящными «палубными» надстройками на крыше-террасе. Слева, перпендикулярно к нему, была пристроена поднятая над землей картинная галерея с криволинейной наружной стеной, обращенной во двор.

В правом крыле виллы расположен меньший по объему трёхэтажный жилой блок. Он был построен для музыканта-скрипача Альберта Жаннере – старшего брата Ле Корбюзье (рис. 8, *правая часть*). Он успел к тому времени перебраться в Париж, жениться и завести четверых детей. Инициатором данного проекта стала его жена Лотти Рааф. Именно на её деньги была возведена эта пристройка. На первом этаже разместились гараж и комната прислуги; на втором, дополненном прямоугольным эркером, – семейные спальни и будуар (комната, принадлежащая Лотти); на третьем – столовая, кухня и рабочий кабинет Альберта.

Maison La Roche была спроектирована уже в совершенно новой для Шарля манере. Подобные постройки в Европе того периода пока ещё были редки, поскольку господствующим стилем оставался неоклассицизм. Характерные особенности данных строений – простые геометрические формы, гладкие белые фасады, горизонтальные ленточные окна, использование внутреннего каркаса. Их также отличает решение внутреннего пространства (так называемый «свободный план»): «Мы живем в мире почти чистой геометрии, геометрии по-человечески чистой, достаточно чистой в нашем восприятии: все вокруг нас есть геометрия; никогда мы настолько ясно не видели различ-

<sup>6</sup> URL: <https://corbusier.livejournal.com/39015.html?ysclid=lo15uo6u76935977688>

ные формы, круги, диски, прямоугольники, углы, вычерченные открыто, с такой резкостью и четкостью, – чистые цилиндры, сферы. Машинизм принес с собой абсолютно новый облик мира...» [2, с. 32] (рис. 9).



Рис. 8. Планы 1-го (а) и 2-го (б) этажей<sup>7</sup>  
Fig. 8. Layout of the 1st (a) and 2nd (b) floors

<sup>7</sup> URL: [https://ya.ru/images/search?img\\_url=https%3A%2F%2Ftecne.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2020%2F10%2FPlanos-de-Villa-La-Roche-Jeanneret-Planta-baja-25C2%25A9FLC.jpg&lr=67&pos=6&rpt=simage&source=serp&text=%20дом%20ла%20роша.%20чертежи%20с%20размерами](https://ya.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Ftecne.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2020%2F10%2FPlanos-de-Villa-La-Roche-Jeanneret-Planta-baja-25C2%25A9FLC.jpg&lr=67&pos=6&rpt=simage&source=serp&text=%20дом%20ла%20роша.%20чертежи%20с%20размерами)



Рис. 9. Вилла Ла Роша/Жаннере. Вид со стороны подъезда; под выступающим эркером – вход в апартаменты Жаннере<sup>8</sup>

Fig. 9. Maison La Roche/Jeanneret. Entrance to Jeanneret apartment under the projecting bay window

Вилла Ла Роша/Жаннере оказалась среди первых заметных построек, выполненных в стиле пуризм («Новое движение»), хотя дух авангарда в то время уже витал в полотнах П. Мондриана, в проунах («проектах утверждения нового») Э. Лисицкого, макетах Г. Ритвельда, творениях других российских и зарубежных архитекторов. В архитектуре начала 1920-х гг. её можно сравнить, к примеру, с модернистскими зданиями архитекторов Р. Малле-Стивенса и П. Ауда, голландской группы «Де Стейл» (г. Лейден, 1917 г.). Привлекает внимание изысканное сочетание на фасадах оконных проёмов разных форм и размеров. А ленточные окна на втором этаже жилого блока и картинной галереи, прорезавшие оба фасада из одного конца в другой, в те времена выглядели совершенно сенсационно. О потенциальных возможностях железобетонных структур тогда ещё и не подозревали (рис. 10, 11).

В вилле Рауля Ла Роша Ле Корбюзье впервые воплотил свои революционные замыслы. Позднее он назовет их «пятью отправными точками архитектуры»: опорные столбы-пилоты, плоская крыша, которая служила садом и террасой, интерьеры с открытой планировкой, ленточные окна и фасад, не-

<sup>8</sup> URL: <https://corbusier.livejournal.com/39015.html?Ysclid=lo15uo6u76935977688>

зависимый от несущей конструкции. Этот дом с его необычными геометрическими формами, минималистской эстетикой и приглушенной цветовой гаммой по праву считается первым «модернистским» проектом [4] (рис. 11–13).

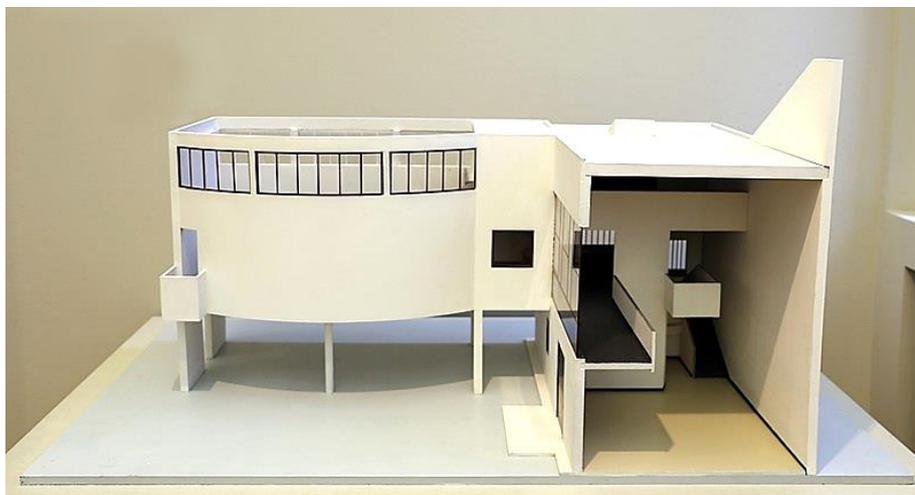


Рис. 10. Картинная галерея виллы Ла Роша/Жаннере. Макет и видовая точка<sup>9</sup>  
Fig. 10. Picture gallery of the Maison La Roche/Jeanneret

<sup>9</sup> URL: [https://ya.ru/images/search?img\\_url=https%3A%2F%2Fi.pinimg.com%2Foriginals%2Fdb%2F7b%2Ff8%2Fdb7bf866c605ab8fb2c481851c38c45e.jpg&lr=67&pos=22&rpt=simage&source=serp&stypе=image&text=вилла%20ла%20роша%20жаннере%20париж%20франция](https://ya.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fi.pinimg.com%2Foriginals%2Fdb%2F7b%2Ff8%2Fdb7bf866c605ab8fb2c481851c38c45e.jpg&lr=67&pos=22&rpt=simage&source=serp&stypе=image&text=вилла%20ла%20роша%20жаннере%20париж%20франция)



Рис. 11. Вилла Ла Роша/Жаннере. Фасад жилого блока со стороны главного входа<sup>10</sup>  
Fig. 11. Villa La Roche/Jeanerret. Residential block facade of the main entrance



Рис. 12. Выход на плоскую крышу дома-студии Ла Роша<sup>11</sup>  
Fig. 12. Exit to the flat roof of the La Roche studio house

<sup>10</sup> URL: [https://ya.ru/images/search?img\\_url=https%3A%2F%2Fpbs.twimg.com%2Fmedia%2FE9eM0c3WQAcY4FW.jpg&lr=67&pos=2&rpt=simage&source=serp&stypе=image&text=вилла%20ла%20роша%20жаннере%20париж%20франция](https://ya.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fpbs.twimg.com%2Fmedia%2FE9eM0c3WQAcY4FW.jpg&lr=67&pos=2&rpt=simage&source=serp&stypе=image&text=вилла%20ла%20роша%20жаннере%20париж%20франция)

<sup>11</sup> URL: <https://www.magazindomov.ru/2013/05/26/villa-la-rosh-villa-la-roche/?ysclid=lo1n2ufodd690642647>



Рис. 13. Нижняя (опорная) часть дома-студии Ла Роша<sup>12</sup>  
 Fig. 13. Lower (supporting) part of the Maison La Roche

Использование в этом уникальном здании облегченных железобетонных конструкций позволило решить его интерьеры в традициях «свободного дизайна». Все комнаты здесь строго дифференцированы по цветовому решению и по характеру освещения (рис. 14).

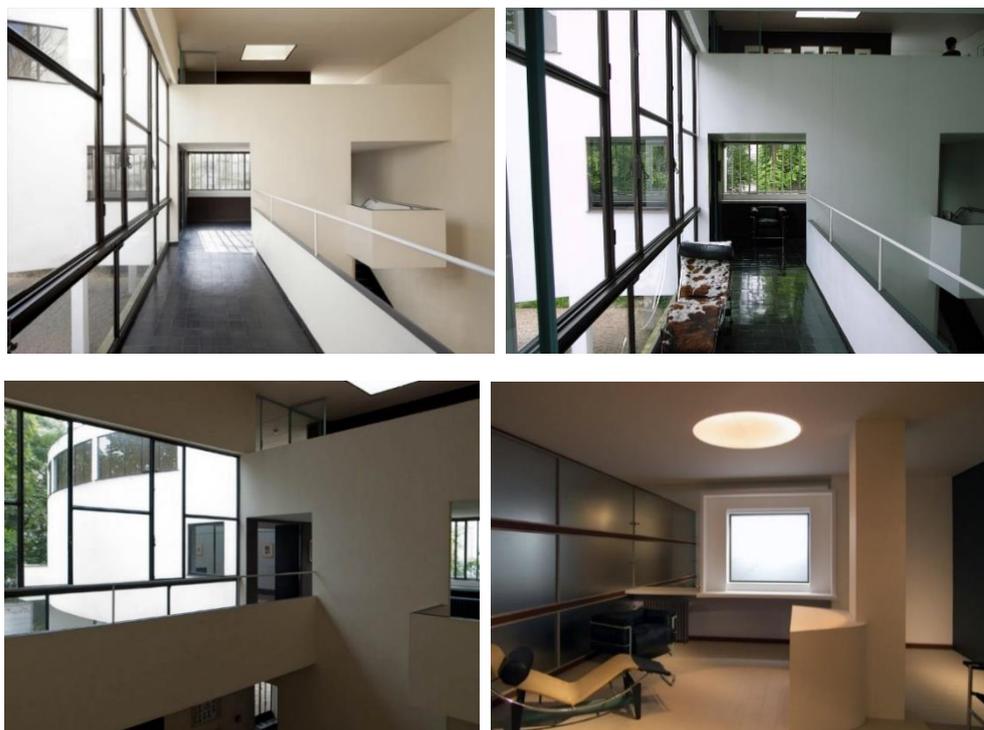
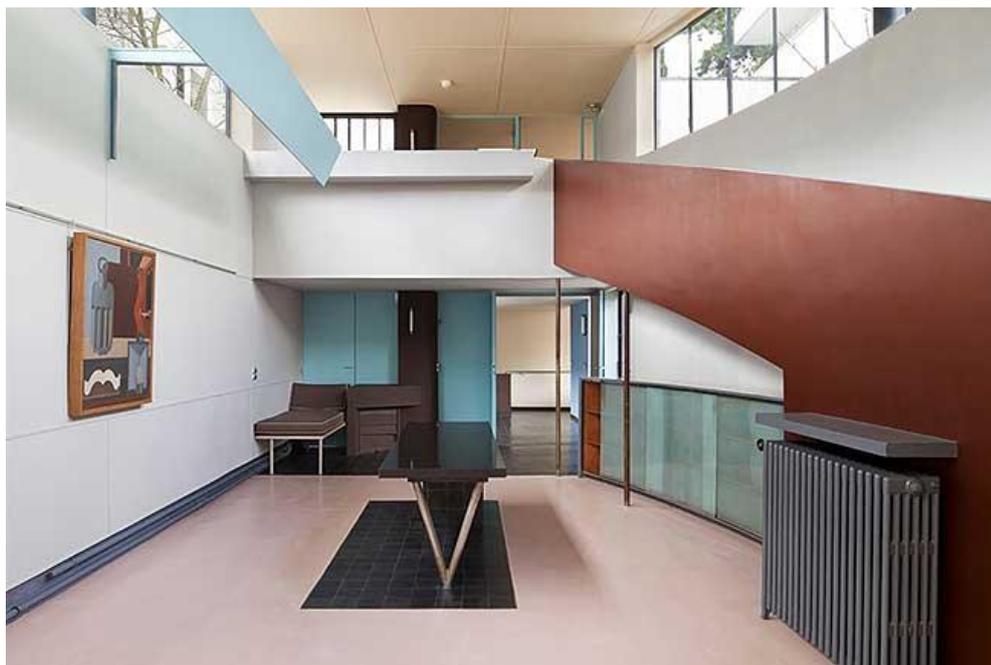


Рис. 14. Интерьеры дома-студии Ла Роша<sup>13</sup>  
 Fig. 14. Maison La Roche interior

<sup>12</sup> URL: <https://www.magazindomov.ru/2013/05/26/villa-la-rosh-villa-la-roche/?ysclid=lo1n2ufodd690642647>

<sup>13</sup> Там же

Как было отмечено ранее, Рауль Ла Рош интересовался современной живописью, коллекционировал картины. Поэтому Шарль Эдуард включил в этот проект картинную галерею для демонстрации произведений художников-кубистов и пуристов. Вместе с Амеде Озанфаном он был у Ла Роша консультантом по выбору и закупке картин. Галерея включала двухсветное пространство с пандусом, поднимаясь по которому можно было любоваться картинами, развешанными на стенах (рис. 15). При этом их число было строго регламентировано: «Для Ле Корбюзье было важно, чтобы не все стены были увешаны картинами...» [5].



*Рис. 15. Интерьер картинной галереи дома-студии Ла Роша<sup>14</sup>*  
*Fig. 15. Interior of art gallery in Maison La Roche*

Именно эта галерея стала первым «домом на ножках», построенным по проекту Ле Корбюзье. В его дальнейших проектах данный конструктивный приём, ставший первым принципом его теории «современной архитектуры», претерпел некоторые изменения и обрел стилистическую отточенность. Однако истоки архитектурной новации Шарля-Эдуарда – именно в проекте 1923 г.

В общей композиции виллы картинная галерея выделяется отдельным, «парящим в воздухе» объёмом. И снаружи, и внутри она выглядит как современный выставочный зал. Свет здесь, как принято в мастерских профессиональных художников, падает сверху, из горизонтальных окон под потолком –

<sup>14</sup> URL: [https://ya.ru/images/search?img\\_url=https%3A%2F%2Fmb.cision.com%2FPublic%2F19273%2FCnct\\_FtrdImg\\_Dj\\_3083644%2F886eb6c133a7af92\\_featured.jpg&lr=67&pos=1&rpt=simage&source=serp&text=Интерьер%20картинной%20галереи%20дома-студии%20Ла%20Роша](https://ya.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fmb.cision.com%2FPublic%2F19273%2FCnct_FtrdImg_Dj_3083644%2F886eb6c133a7af92_featured.jpg&lr=67&pos=1&rpt=simage&source=serp&text=Интерьер%20картинной%20галереи%20дома-студии%20Ла%20Роша)

идеальное освещение для выставочного помещения. Пространство развивается в двух уровнях. Пологий пандус повторяет очертания плавно изогнутой стены и ведёт вверх, на открытый балкон, где размещается библиотека: «Двухэтажное здание с изогнутой конструкцией обладает головокружительной и замысловатой планировкой. Оно используется в качестве художественной галереи хозяина...» [5] (рис. 16, 17).

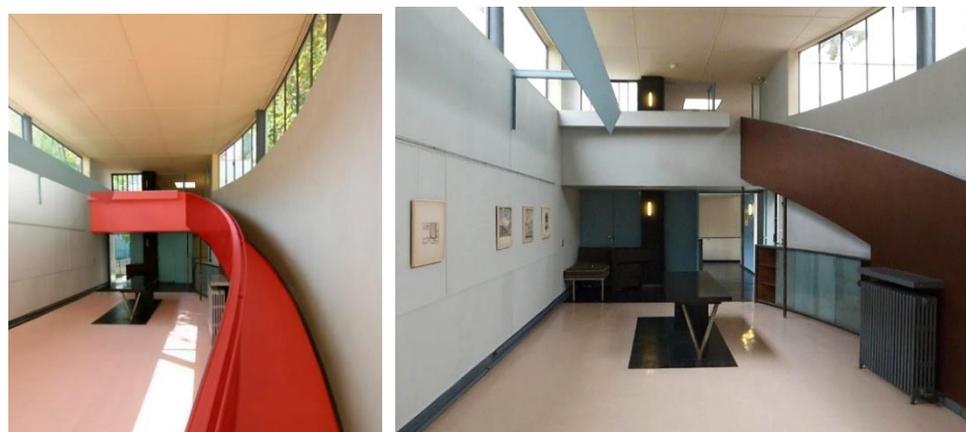
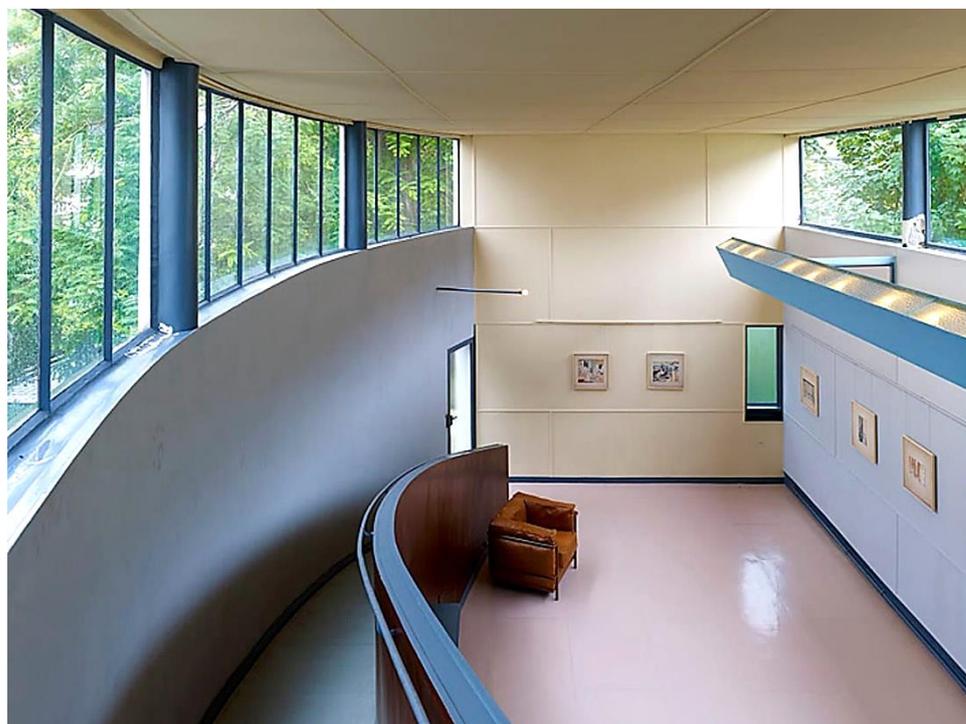


Рис. 16. Дом-студия Ла Роша. Интерьер картинной галереи<sup>15</sup>  
Fig. 16. Interior of the picture gallery in Maison La Roche

<sup>15</sup> URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Вилла\\_Ла\\_Рош/\\_Жаннере#/media/Файл:Rampa\\_Interior.jpg](https://ru.wikipedia.org/wiki/Вилла_Ла_Рош/_Жаннере#/media/Файл:Rampa_Interior.jpg)



Рис. 17. Интерьер картинной галереи дома-студии Ла Роша. Видовые точки<sup>16</sup>  
Fig. 17. Interior of the picture gallery in Maison La Roche

<sup>16</sup> URL: [https://ya.ru/images/search?img\\_url=https%3A%2F%2Fp.inimg.com%2Foriginals%2F4d%2Ffe%2Fe7%2F4dfee77a47dbf9a72b82a81054de7056.jpg&lr=67&pos=36&rpt=simage&source=serp&stypе=image&text=вилла%20ла%20роша%20жаннере%20париж%20франция](https://ya.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fp.inimg.com%2Foriginals%2F4d%2Ffe%2Fe7%2F4dfee77a47dbf9a72b82a81054de7056.jpg&lr=67&pos=36&rpt=simage&source=serp&stypе=image&text=вилла%20ла%20роша%20жаннере%20париж%20франция)

«Проект был новаторским для своего времени, принес известность архитектору, но заказчики – семья богатого коллекционера – остались не очень довольны и вскоре принялись за дорогостоящий ремонт...» [6].

В годы Второй мировой войны семья Ла Роша сначала жила в Лионе, а затем вернулась в Париж. Их уникальный дом и галерея не пострадали. В 1965 г. Рауль, страдающий серьезным ревматическим заболеванием, вернулся в свой родной город Базель, а его коллекция картин была передана в дар музеям Швейцарии и Франции. Часть бывшей виллы, относившаяся к апартаментам Р. Ла Роша, ныне открыта для туристов. Сейчас здесь располагается Fondation Le Corbusier («Фонд Ле Корбюзье»), основанный в 1968 г. Он занимается сохранением и популяризацией творческого наследия знаменитого архитектора.

Дальнейшее развитие творческие поиски Шарля-Эдуарда получили в вилле Штейна/де Монзи в Гарше (1925–1928 гг.). Этому, по-своему уникальному, проекту будет посвящена следующая статья.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Московские проекты* великого архитектора Ле Корбюзье // Москва24. URL: <https://www.m24.ru/articles/arhitektura/19112012/9157>
2. *Ле Корбюзье*. Новый дух в архитектуре. Москва : Strelka Press, 2017. 120 с.
3. *Поляков Е.Н., Полякова О.П.* «Кубическое» направление в творчестве Шарля-Эдуарда Жаннере-Гри (Ле Корбюзье) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 9–28.
4. *Ле Корбюзье*. Творческий путь // elima.ru. – Аспекты строительного проектирования. URL: <https://elima.ru/articles/?id=800>
5. *Le Corbusier*. Ле Корбюзье. Архитектор и дизайнер. Основатель функционализма // Музей дизайна. URL: <https://museum-design.ru/le-corbusier/>
6. *Самые известные строения Ле Корбюзье*. URL: <https://www.rmnt.ru/story/realty/samye-izvestnye-stroenija-le-korbjuze.1528408/>

#### REFERENCES

1. Moscow projects of Le Corbusier, the great architect. Available: [www.m24.ru/articles/arhitektura/19112012/9157](http://www.m24.ru/articles/arhitektura/19112012/9157) (In Russian)
2. *Le Corbusier*. New spirit in architecture. Moscow: Strelka Press, 2017. 120 p. (In Russian)
3. *Polyakov E.N., Polyakova O.P.* Cubism in creative activity of Le Corbusier. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (6): 9–28. (In Russian)
4. Le Corbusier. Creative Way. Aspects of building design. Available: <https://elima.ru/articles/?id=800> (In Russian)
5. Le Corbusier. Le Corbusier. Architect and designer. Founder of functionalism. Design Museum. Available: <https://museum-design.ru/le-corbusier/> (In Russian)
6. The most famous buildings of Le Corbusier. Available: [www.rmnt.ru/story/realty/samye-izvestnye-stroenija-le-korbjuze.1528408/](http://www.rmnt.ru/story/realty/samye-izvestnye-stroenija-le-korbjuze.1528408/) (In Russian)

#### Сведения об авторах

*Поляков Евгений Николаевич*, докт. искусствоведения, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [polyakov.en@yandex.ru](mailto:polyakov.en@yandex.ru)

*Полякова Ольга Павловна*, канд. экон. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

**Authors Details**

*Evgenii N. Polyakov*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, polyakov.en@yandex.ru.

*Olga P. Polyakova*, PhD, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia.

**Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Authors contributions**

The authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 29.01.2024  
Одобрена после рецензирования 14.02.2024  
Принята к публикации 01.03.2024

Submitted for publication 29.01.2024  
Approved after review 14.02.2024  
Accepted for publication 01.03.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 2. С. 26–35.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (2): 26–35.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 711.01/.09

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-26-35

EDN: BJXNZA

## ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНОГО ЛАНДШАФТА НА ФОРМИРОВАНИЕ ВИЗУАЛЬНОГО ОБРАЗА ИСТОРИЧЕСКОГО ГОРОДА НА ПРИМЕРЕ САРАТОВА

**Инна Викторовна Архангельская, Нина Викторовна Фурман**  
*Саратовский государственный технический университет  
им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия*

**Аннотация.** Актуальность настоящего исследования обусловливается повышением значимости природного ландшафта в формировании городской среды. В статье предпринимается попытка осмысления роли и места природного ландшафта в формировании визуального образа исторического города.

**Целью** работы является определение структурообразующих компонентов природного каркаса Саратова, которые имеют определяющее значение в формировании визуального образа города.

На основе проведённого анализа научных работ, посвящённых данной тематике, были выделены утверждения, определившие ход дальнейшего исследования. Существуют некие ключевые элементы ландшафта, формирующие образную выразительность и взаимосвязь природных и антропогенных подсистем в пространстве города.

**В результате** исследования ландшафтной основы г. Саратова выделяется два уровня формирования визуального образа исторического города, описывается их влияние на его архитектурно-планировочную структуру.

**Ключевые слова:** образ города, ландшафт, образная константа

**Для цитирования:** Архангельская И.В., Фурман Н.В. Влияние природного ландшафта на формирование визуального образа исторического города на примере Саратова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 26–35. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-26-35. EDN: BJXNZA

ORIGINAL ARTICLE

## NATURAL LANDSCAPE IN THE FORMATION OF HISTORICAL CITY SARATOV

**Inna V. Arkhangelskaya, Nina V. Furman**  
*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia*

**Abstract. Purpose:** The aim of this work is to determine the structural components of the natural landscape of Saratov and comprehend its role and place in the formation of this historical city.

*Research findings:* Based on the analysis of related research results, the forwarded statements determine further research. The detected key elements of the landscape provide the expressiveness and interrelation of natural and anthropogenic subsystems in the city. Two levels of the city formation are distinguished together with their structure and influence on the city of Saratov.

**Keywords:** landscape, figurative constant, city

**For citation:** Arkhangel'skaya I.V., Furman N.V. Natural landscape in the formation of historical city Saratov. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 26–35. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-26-35. EDN: BJXNZA

### Введение

Интенсивное развитие крупного исторического города неизбежно приводит к трансформации его архитектурно-пространственной структуры, в связи с этим возникает проблема сохранения своеобразия архитектурно-градостроительного облика и визуальной идентичности. В то же время природный ландшафт всё более интегрируется в городскую среду, насыщая её новыми визуальными качествами. Эстетические качества визуального облика города напрямую связаны с особенностями его природного ландшафта, который является основой территориального развития города.

В работе «Эстетика города» З.Н. Яргина [1] отмечает, что выделение признаков пространственной структуры ландшафта определяет его своеобразие и позволяет сохранить индивидуальность облика при составлении долгосрочных прогнозов. А.У. Ри [2] в своих исследованиях утверждает, что выразительность города можно рассматривать как органичное единство природного окружения, застройки и планировки. В.Р. Крогус [3] в книге «Город и рельеф» подчеркивает, что наибольшая органичность при проектировании городского пространства может быть достигнута путём совмещения «проектируемых структурных элементов города с естественными визуальными пространствами». С. Аллен в работе «Параметрический урбанизм» [4] определяет ландшафт «как формообразующую модель для урбанизма». Е.А. Лапшин [5] называет рельеф местности «одним из источников формирования образа города».

На разных этапах исторического развития города можно выделить ключевые элементы природного ландшафта, через которые проходит вектор его развития. Это так называемые центральные места, места наибольшей функциональной активности, где формируются традиционные культурные ландшафты. А.А. Качемцева [6] предлагает для обеспечения принципов пространственной преемственности исторических городов выделять водно-зелёные каркасы и анализировать эволюцию изменений озеленённых территорий во времени. Е.М. Климина [7] определяет культурный ландшафт города как историческую равновесную систему, «в которой природные и культурные компоненты составляют единое целое». Н.И. Ежова [8] считает культурный ландшафт города сложной системой, где каждый элемент имеет множество функций, задач и смыслов. Городской ландшафт – это место, где непрерывно образуются утилитарные, вещественные, смысловые и символические связи, которые видоизменяются во времени. М.В. Скуднева, изучая этапы развития

культурного ландшафта сибирских городов [9], рассматривает природную составляющую как неотъемлемую часть городского пространства [10].

Влиянию природного ландшафта на формирование города посвящено множество исследований, в которых в зависимости от целей и задач ландшафт интерпретируется по-разному. Так, З.С. Нагаева и С.С. Сейтумерова предложили архитектурные концепции, определяющие архитектурно-композиционную роль ландшафта, объединить в четыре основные группы:

- ландшафт как морфологическая основа архитектурной композиции (Ю.И. Курбатов, Р. Пиетиль, Г.Б. Бархин, В.Л. Антонов, А.Э. Гутнов);
- ландшафт как образформирующая система (Г.П. Гольц, К. Линч);
- ландшафт как текст и информация (Ю.И. Курбатов, К. Линч);
- ландшафт как источник символов (Дж.О. Сайсмонд, А.В. Иконников) [11].

### Постановка задачи. Методы исследования

В настоящем исследовании для изучения динамики формирования визуального образа города как ментального отражения архитектурно-градостроительного облика исторического города природный ландшафт предлагается рассматривать в предложенных выше трактовках.

Применительно к городу можно выделить следующие уровни формообразования рельефа по крупности, которые оказывают влияние на архитектурно-планировочную структуру:

а) «микрорельеф – отдельные мелкие формы или элементы рельефа площадью 25 га и длиной менее 1 км, влияющие в основном на городскую застройку (решения зданий, сооружений и их комплексов);

б) мезорельеф – отдельные крупные формы или комплексы более мелких форм рельефа площадью до 10 тыс. га и длиной до 10–15 км, влияющие в основном на городскую планировку (решение города в целом и его отдельных районов)» [3, с. 32].

Мезорельеф оказывает заметное влияние на планировочную структуру города. Неудобные для застройки территории (поймы рек, большие крутые склоны, лощины, крупные овраги), как правило, растущий город обходит, часто оставляя их в своей пространственно-планировочной структуре неизменными. Особо крупные элементы мезорельефа могут расчленивать территорию города, в то время как более мелкие элементы микрорельефа (балки, мелкие овраги) по мере роста города и уплотнения застройки часто выполаживаются. Структурно-пространственный и визуальный анализ рельефа по этапам развития города позволит выявить ключевые, определяющие вектор территориально-пространственного развития города, и наиболее стабильные во времени элементы, обуславливающие своеобразие облика и, как следствие, визуального образа города. В зависимости от характера рельефа данные элементы могут быть как структурообразующими (определять планировочную структуру города), так и панорамообразующими (служить фоном для городской застройки, влиять на визуальную глубину и плановость панорамы).

Автором настоящей работы, И.В. Архангельской, был предложен метод исследования визуального образа исторического города, который основывает-

ся на выявлении образных констант и определении их изменений на всех исторических этапах развития города [12]. Образные константы представляют собой элементы или структуры городского (урбанизированного) ландшафта – природно-антропогенной системы, которые сохраняют образное содержание в процессе исторического развития.

Исследование ландшафта как образформирующей системы является необходимым при составлении долговременных прогнозов развития визуального образа города.

Исследователи Е.В. Альземенова и Ю.В. Мамаева утверждают: «Климатические характеристики, ландшафт, водные объекты и растительные компоненты уникальны в зависимости от географического расположения региона и неотделимы от целостного образа города» [13, с. 40]. По мере роста города меняется взаимосвязь его архитектурно-градостроительной структуры с элементами природного ландшафта, чаще всего заключающаяся в постепенном «поглощении» городской застройкой природных территорий. Поэтому природный каркас города является одной из основ формирования идентичности (опознаваемости) городского образа. Как следствие, для обеспечения принципов пространственной преемственности развития исторического города необходимо выделять водно-зелёные (природные, природно-рекреационные) каркасы и анализировать эволюцию изменений озеленённых городских территорий во времени.

При изучении динамики формирования визуального образа города представляется важным выявление не только существующих образных констант – природных символов города, но и тех, которые по мере территориально-пространственного развития города могли перейти из разряда реальных символов-знаков местности в ментальные (например, имевшие в прошлом структурообразующее значение овраги, балки могли быть с течением времени засыпаны, но как символы сохранились в топонимике местности, в названиях улиц). Выявление данных символов ландшафтными средствами (например, возвращение оврагам их первоначального значения элементов природного каркаса) позволит сохранить визуальную идентичность развивающегося крупного исторического города.

Описанные выше подходы к определению влияния природного ландшафта на формирование визуального образа крупного исторического города применимы для изучения визуального образа волжского города Саратова.

### **Результаты и обсуждение**

Наиболее полное и всеобъемлющее исследование эволюции основных природных компонентов ландшафта г. Саратова провела О.Н. Клочкова в своей диссертационной работе «Принцип формирования ландшафта городов ядра Саратовской агломерации» [14]. Были рассмотрены этапы формирования архитектурно-пространственной структуры города, её обусловленность ландшафтной основой, доминирование природного окружения на первоначальном этапе развития города и дальнейший переход к локальному восприятию ландшафта через разрывы плотной многоэтажной застройки (восприятию видовых кадров).

Изначальное положение Саратова и дальнейшее формирование его планировочной структуры было определено рельефом местности (рис. 1, 2). На

первоначальном этапе формирования город представлял собой компактное поселение на берегу Волги в окружении гор Соколовой и Лысой. Ярко выраженный рельеф местности превалировал над застройкой, планировочная сетка улиц располагалась на плато, представляющем собой полукруг, окружённый горами и раскрывающийся к Волге. Начиная с 30-х гг. XX в. город стал развиваться экстенсивным путём и уже к концу XX в. разделился на зоны исторической части и периферию, при этом наблюдалась утрата визуальных и структурных связей с Волгой.

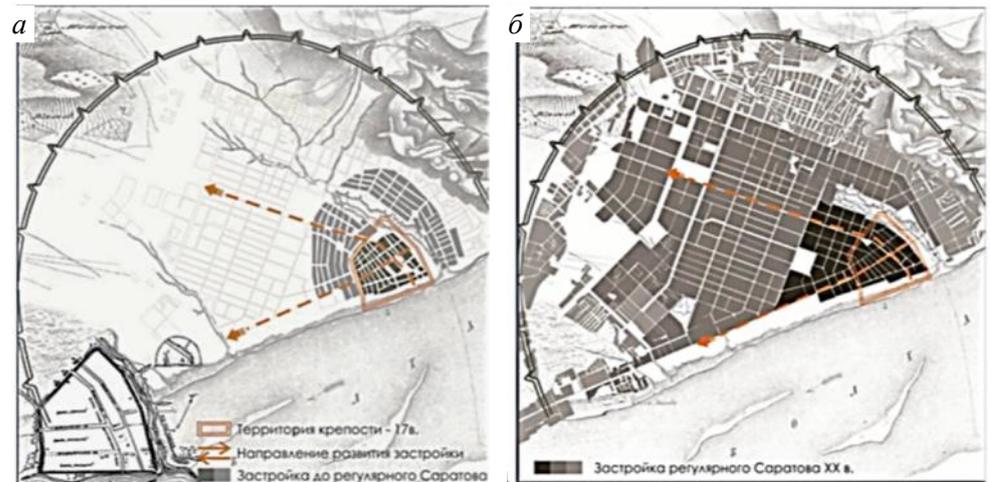


Рис. 1. Этапы формирования планировочной структуры г. Саратова:

*a* – застройка дорегулярного Саратова в XVII–XVIII вв. (выделена территория крепости, указаны направления развития застройки); *б* – застройка регулярного Саратова в XIX – начале XX в.

Fig. 1. Stages of formation of the planning structure of Saratov:

*a* – development of Saratov in the 17–18th centuries; *b* – development of Saratov in the 19 and early 20th centuries

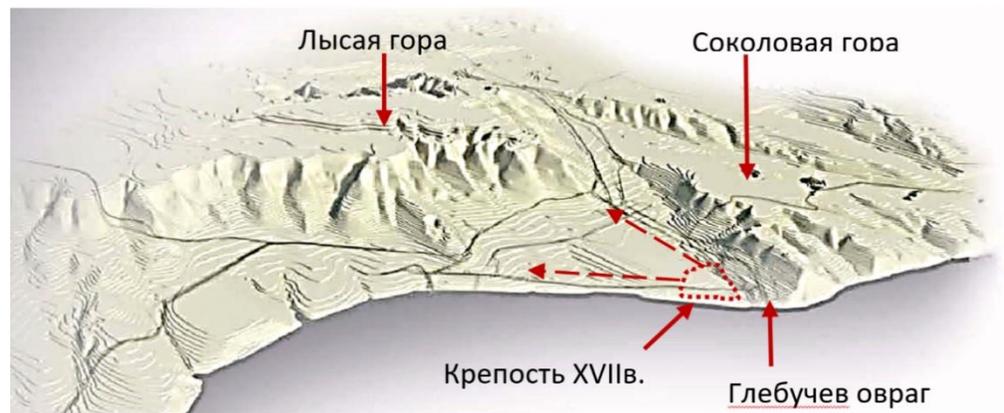


Рис. 2. 3D-модель рельефа г. Саратова (для наглядности масштаб по вертикали увеличен в пять раз)

Fig. 2. 3D model of Saratov topography. 5-fold magnification

Современный Саратов можно разделить на четыре части, сложившиеся в разное время. Это исторический центр, или центральная часть, южная, северо-западная и северная (рис. 3). Саратов окружён с четырёх сторон горами Приволжской возвышенности: Увеком, Алтынной, Лопатиной, Лысой и Соколовой. В процессе исторического развития он огибал сложный рельеф и занимал более удобные территории [14]. Южная и центральная части города расположены в котловине. На поверхности Лысогорского плато находится лесопарк Кумысная поляна, которая имеет статус особо охраняемой территории и играет важную эстетическую, оздоровительную и экологическую роль в жизни города. Лесопарк окаймляет город, спускается к нему по склонам зелёными массивами, наполняет город воздухом. Здесь можно наблюдать переход рельефа из категории естественной преграды в категорию особо ценного природного ресурса. Изначально рельеф задал вектор развития городу, а впоследствии обогатил его особо ценными природными территориями.

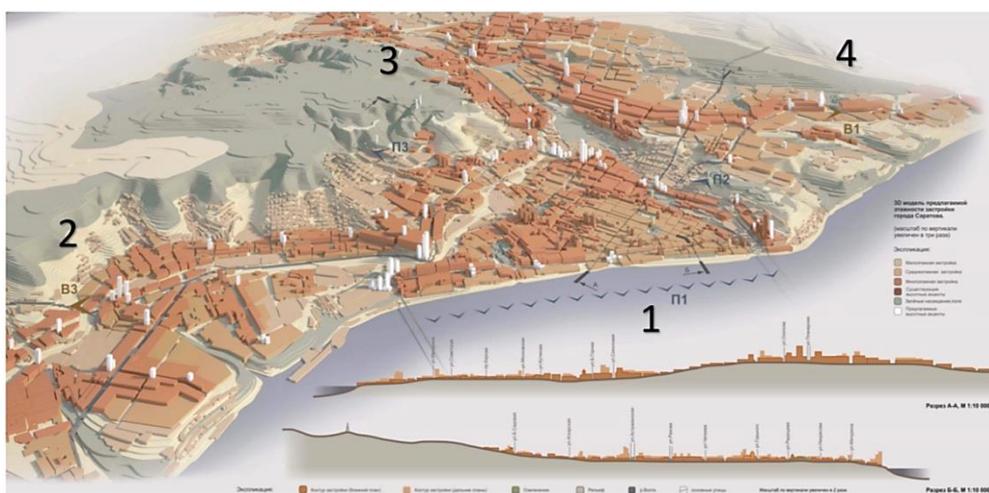


Рис. 3. Проект вертикальной композиции г. Саратова (дипломный проект, авт. Е.В. Железко, руководители: Л.Г. Тарасова, А.Н. Кискин, С.В. Лазарев, СГТУ им. Гагарина Ю.А., 2013 г.). 3D-модель визуализирует обусловленное рельефом членение города на 4 части:

1 – центральную (историческую); 2 – южную; 3 – северо-западную; 4 – северную

Fig. 3. 3D model topography of Saratov (thesis project by E.V. Zhelezko, supervisors: L.G. Tarasova, A.N. Kiskin, S.V. Lazarev, Y.A., 2013) divided into 4 parts:

1 – central (historical); 2 – southern; 3 – north-western; 4 – northern

Рельеф Саратова определяется как ярко выраженный, дающий картины и замкнутого, и раскрытого вида. Максимальный перепад рельефа – около трёхсот метров. Горы определяют характер облика города, создают мягкий фоновый силуэт. Но ведущим элементом Саратова была и остаётся р. Волга, формирующая главный фасад города с реки.

Доминирующая образная константа города – территория исторического ядра, когда-то занимаемая деревянной крепостью: мыс при впадении широкого Глебучевого оврага в р. Волгу (рис. 4). Это место, где был образован

город, отсюда он получил своё развитие по двум главным векторам: ул. Московской по направлению в Москву, проложенной вдоль Глебучева оврага, и ул. им. Н.Г. Чернышевского (Большой Сергиевской, Царицынской), идущей вдоль высокого берега Волги в южном направлении. Таким образом, Глебучев овраг одновременно является и планировочным, и природным (структурообразующим) компонентом, одним из природных символов города. Волга, в рассматриваемой константе, определяется ярко выраженным природным компонентом, как структурообразующим, так и символическим.



Рис. 4. Саратов:

*a* – Соборная площадь с Троицким собором (XVII–XVIII вв.); *б* – вид сверху на самую древнюю часть города, пунктиром выделена территория деревянной крепости XVII в. (современный спутниковый снимок)

Fig. 4. Saratov:

*a* – Cathedral Square with the Trinity Cathedral (17–18th centuries); *b* – satellite image of the oldest part of the city. Dashed line indicates the territory of the wooden fortress of the 17th century

На картине саратовской художницы Е.Ю. Слыщенко изображён вид на город с Соколовой горы. Перед зрителем открывается уникальная панорама, в которую умещается сразу четыре плана: холмы, город (его исторический центр), Волга, и снова город, только теперь уже его южная окраина, на картине почти сливающаяся с небом (рис. 5). На фоне серебристого мерцания Волги виден силуэт Троицкого собора, а также массивы исторических зданий, утопающих в зелени. Всё это как будто бы окутано нежной, полупрозрачной дымкой, и только холм на переднем плане ловит последний луч заходящего солнца.

Именно эта работа, где городская застройка изображена достаточно обобщённо, как нельзя лучше раскрывает истинный образ Саратова в контексте ландшафтной основы, который формируется благодаря живописным холмам и Волге, делающей небольшой изгиб у берегов. Историческая часть города расположена в своеобразной «чаше», окружённой холмами. Представляется интересным и важным выявить на холмах наиболее выгодные в плане эстетического восприятия точки и организовать в этих местах смотровые площадки, а также проложить зелёные коридоры, связывающие образные константы.



Рис. 5. Город Саратов:

*a* – картина Е.Ю. Слыщенко «Вид на г. Саратов с Соколовой горы» (2010 г.); *б* – памятник «Журавли», архитектор Ю.И. Менякин (фото 1985 г.), на среднем плане – Свято-Духовский собор (XIX в.)

Fig. 5. Saratov:

*a* – painting by E.Yu. Slyshchenko "Saratov from Sokolovaya Gora" (2010); *b* – monument "Cranes", architect Y.I. Menyakin (photograph 1985) and St. Dukhov Cathedral (19th century)

Окружающие центральную историческую часть города горы также воспринимаются снизу вверх, из города, и при помощи продуманно расставленных архитектурных доминант можно усилить их восприятие и наполнить новыми смыслами. Так, памятник «Журавли» и мемориальный комплекс «Парк Победы», посвящённый сорокалетнему юбилею Победы в Великой Отечественной войне, стал настоящим символом города, архитектурным акцентом на вершине Соколовой горы.

### Выводы

Таким образом, крупные элементы рельефа (мезорельеф) – р. Волга, на берегу которой был основан г. Саратов, определившая его развитие, и горы – сформировали архитектурно-пространственную структуру города совместно с крупной овражной системой, повлиявшей на планировочную структуру, и являются природными образными константами, одновременно реальными и ментальными символами города. Менее крупные элементы рельефа (микрорельеф) – небольшие овраги и балки – повлияли на рисунок планировочной структуры, но со временем исчезли под застройкой и дорогами, превратились в парковые территории. Эти природные элементы, сохранившиеся в топонимике местности, в названиях улиц, являются константами, перешедшими в разряд ментальных символов-знаков.

Образные константы, в зависимости от положения в городе, могут различаться по степени выраженности природного компонента. На основе данного исследования является важным выявить и предложить варианты проектных решений, способствующих усилению содержания природного компонента образной константы, выявлению своеобразия природного ландшафта города.

Обобщая вышеизложенное, можно заключить, что природный ландшафт территории задаёт вектор развития города, определяет его планировку,

наполняется соответствующими функциями и эволюционирует параллельно с развитием города. Двигается от традиционного ландшафта, где человек определяется как неразрывная часть природы к человеку-покорителю природы [9]. На всех этапах развития города можно выделить ключевые элементы ландшафта, которые от этапа к этапу формируют своеобразные точки роста, места функциональной активности и образной выразительности, сохраняющие свои свойства во времени.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Яргина З.Н.* Эстетика города. Москва : Стройиздат, 1991. 365 с.
2. *Ри А.У.* Формирование архитектурно-пространственного своеобразия городов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2011. № 1 (1). С. 207–211.
3. *Крогиус В.Р.* Город и рельеф. Москва : Стройиздат, 1979. 124 с.
4. *Allen S.* MatUrbanism: Thethick2D. Munich. Prestel. Harvard School, 2001. P. 118–126.
5. *Лапина Е.А.* Динамика влияния природного рельефа на формирование композиции города : специальность 18.00.01 «Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата архитектуры / МАРХИ. Москва, 1995. 17 с.
6. *Качемцева А.А.* Графические источники в преемственном ландшафтном развитии водно-зелёного каркаса исторического поселения // Ландшафтная архитектура и формирование комфортной городской среды. Нижний Новгород : ННГАГУ, 2022. С. 24–34.
7. *Климина Е.М.* Культурные ландшафты в экологическом каркасе Нижнего Приамурья // Вестник ДВО РАН. 2010. № 6. С. 24–29.
8. *Ежова Н.А.* Ценностная морфология культурного ландшафта // Аналитика культурологии. 2006. № 2. С. 177–182.
9. *Скуднева М.В.* Культурный ландшафт исторического города Сибири : специальность 18.00.01 «Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия» : автореферат на соискание ученой степени кандидата архитектуры / Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия. Новосибирск, 2005. 28 с.
10. *Скуднева М.В.* Основы сохранения культурного ландшафта в среде исторического сибирского города // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 23–29. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-23-29. EDN: ZPLDDK
11. *Нагаева З.С., Сейтумерова С.С.* Развитие ландшафтного урбанизма как дисциплины // Строительство и техногенная безопасность. 2014. № 51. С. 45–52. EDN: VMKERZ
12. *Альземенова Е.В., Мамаева Ю.В.* Идентичность городской среды // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2021. № 2 (36). С. 40–47.
13. *Архангельская И.В.* Эволюция визуального образа исторического города // Архитектон: известия вузов. 2023. № 2 (82). URL: [http://archvuz.ru/2023\\_2/6/](http://archvuz.ru/2023_2/6/). DOI: 10.47055/19904126\_2023\_2(82)\_6
14. *Клочкова О.Н.* Принципы формирования ландшафта городов Саратовской агломерации : специальность 18.00.04 «Градостроительство, районная планировка, ландшафтная архитектура и планировка сельских населённых мест» : диссертация на соискание ученой степени кандидата архитектуры / ЛИСИ. Ленинград, 1989. 215 с.

## REFERENCE

1. *Yargina Z.N.* Aesthetics of the city. Moscow: Stroyizdat, 1991. 365 p. (In Russian)
2. *Ri A.U.* Formation of architectural and spatial originality of cities. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2011; 1 (1): 207–211. (In Russian)
3. *Krogius V.R.* City and relief. Moscow: Stroyizdat, 1979. 124 p. (In Russian)
4. *Allen S.* MatUrbanism: Thethick2D. Munich. Prestel, Harvard School, 2001. Pp. 118–126.

5. *Lapshina E.A.* Dynamics of the influence of natural relief on the formation of the composition of the city. PhD Abstract. Moscow, 1995. 17 p. (In Russian)
6. *Kachemtseva A.A.* Graphic sources in successive landscape development of water-green framework in historical settlement. In: Landscape architecture and formation of a comfortable urban environment. Nizhny Novgorod, 2022. Pp. 24–34. (In Russian)
7. *Klimina E.M.* Cultural landscapes in ecological framework of the Lower Amur region. *Vestnik DVO RAN*. 2010; (6): 24–29. (In Russian)
8. *Yezhova N.A.* Valuable morphology of cultural landscape. *Analitika kul'turologii*. 2006; (2): 177–182. (In Russian)
9. *Skudneva M.V.* Cultural landscape of historical city in Siberia. PhD Abstract. Novosibirsk, 2005. 28 p. (In Russian)
10. *Skudneva M.V.* Preservation of cultural landscape in the historical Siberian city. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (3): 23–29. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-23-29. EDN: ZPLDDK (In Russian)
11. *Nagaeva Z.S., Seitumerova S.S.* Development of landscape urbanism as a discipline. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'*. 2014; (51): 45–52. EDN: VMKERZ (In Russian)
12. *Alzemeneva E.V., Mamaeva Yu.V.* Identity of urban environment. *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiya*. 2021; 2 (36): 40–47. (In Russian)
13. *Arkhangelskaya I.V.* Evolution of historical city. *Arkhitekton: izvestiya vuzov*. 2023; 2 (82). Available: [http://archvuz.ru/2023\\_2/6](http://archvuz.ru/2023_2/6). DOI: 10.47055/19904126\_2023\_2(82)\_6 (In Russian)
14. *Klochkova O.N.* Formation principles of landscape in Saratov agglomeration. PhD Thesis. Leningrad, 1989. 215 p. (In Russian)

#### Сведения об авторах

*Архангельская Инна Викторовна*, доцент, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, anp-inna@yandex.ru

*Фурман Нина Викторовна*, канд. архитектуры, доцент, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, catalpa1@mail.ru

#### Authors Details

*Inna V. Arkhangelskaya*, A/Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Politekhnicheskaya Str., 410054, Saratov, Russia, anp-inna@yandex.ru

*Nina V. Furman*, PhD, A/Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Politekhnicheskaya Str., 410054, Saratov, Russia, catalpa1@mail.ru

#### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Authors contributions

The authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.09.2023  
Одобрена после рецензирования 17.02.2024  
Принята к публикации 01.03.2024

Submitted for publication 10.09.2023  
Approved after review 17.02.2024  
Accepted for publication 01.03.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 2. С. 36–47.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (2): 36–47.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 711.4+711.13

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-36-47

EDN: BLTGET

## АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ АРКТИЧЕСКИХ ГОРОДОВ

**Сергей Михайлович Ремарчук**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия*

**Аннотация.** *Актуальность.* Статья посвящена поиску новых подходов к проектированию арктических городов на фоне глобальных климатических изменений состояния вечной мерзлоты. В исследовательскую часть вошли демографические, этнографические и туристические аспекты проектирования городов в Арктической зоне РФ.

*Научная новизна* заключается в выработке новых подходов к проектированию опорных и базовых населенных пунктов Арктической зоны РФ в зависимости от их статуса и численного состава. Методологической и теоретической основой исследования послужили научные труды градостроителей и архитекторов, занимающихся вопросами расселения в условиях Крайнего Севера, а также практиков в области проектирования современных жилых и общественных комплексов Арктики.

На основе собранных данных климатических изменений, а также численного состава населенных пунктов Арктической зоны РФ были сделаны выводы о необходимости поиска иных подходов к проектированию городской среды, чем в центральных и южных регионах нашей страны.

*В результате* проведенного анализа были определены основные подходы к проектированию арктических городов.

*Практическая значимость* исследования заключается в возможности использования обозначенных направлений в дальнейших исследованиях градостроителей и архитекторов, а также при создании новых архитектурных комплексов в Арктической зоне РФ.

**Ключевые слова:** опорные города, вахтовые поселения, Арктическая зона РФ, вечная мерзлота, глобальное потепление, коренные народы Севера

**Для цитирования:** Ремарчук С.М. Анализ современных подходов к проектированию арктических городов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 36–47. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-36-47. EDN: BLTGET

ORIGINAL ARTICLE

## THE ANALYSIS OF NOVEL APPROACHES TO ARCTIC CITIES DESIGN

Sergey M. Remarchuk

*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

**Abstract.** The paper is devoted to novel approaches to the design of Arctic cities against global climate changes in permafrost regions. The paper studies demographic, ethnographic and tourist aspects of the city design in the Arctic zone of the Russian Federation.

**Methodology/approach:** The development of new approaches to design and settlements in the Arctic zone of the Russian Federation. The methodology and theory of this study is based in research of urban planners and architects engaged in problems of settlement in the Far North and design of modern residential and public buildings in the Arctic zone.

**Research findings:** It is shown that approaches to the design of the urban environment and in the central and southern regions of our country are different. As a result, the main approaches are identified for Arctic cities.

**Practical implications:** The proposed approaches can be used by urban planners and architects for the creation of new architectural complexes in the Arctic zone of the Russian Federation.

**Keywords:** support cities, rotational settlements, Arctic zone of the Russian Federation, permafrost, global warming, indigenous peoples of the North

**For citation:** Remarchuk S.M. The analysis of novel approaches to Arctic cities design. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (2): 36–47. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-36-47. EDN: BLTGET

### Введение

Согласно распоряжению Правительства РФ от 28 ноября 2023 г. № 3377-р, в перечень опорных населенных пунктов Арктической зоны Российской Федерации вошел 131 населенный пункт. Это означает, что Архангельск, Мурманск, Норильск, Воркута, Анадырь, Новый Уренгой, Нарьян-Мар и еще 124 города смогут получить от государства финансирование на развитие отраслей, в которых они испытывают наибольшую потребность. Все населенные пункты Арктической зоны РФ были проанализированы и сгруппированы относительно их специализации. Так, Норильск, являясь одновременно опорным по нескольким позициям (в сфере внутренней безопасности, как важнейший грузопассажирский авиаузел и социокультурный центр), стал опорным в сфере инновационного и информационного обеспечения социально-экономического развития Арктической зоны РФ, а также как центр обеспечения добывающей промышленности [1].

Опорные и базовые населенные пункты<sup>1</sup>, обозначенные транспортно-логистическими центрами, со стороны государства могут быть обеспечены безопасной и высококачественной связью, где пропускная способность транспортно-пересадочных узлов может быть расширена. Дополнительно возможен

<sup>1</sup> В.К. Свешников так определяет количественные критерии арктических городов: опорные – 300 тыс. жителей, базовые – 80–150 тыс., промышленные – 15–30 тыс. жителей, вахтовые и экспедиционные поселки.

ремонт существующих и создание новых зимников, железнодорожных веток и взлетно-посадочных полос. Так называемые минерально-сырьевые центры могут претендовать на создание филиалов учреждений высшего и среднего специального образования, содействие размещению испытательных лабораторий и научных экспериментальных центров.

Таким образом, один населенный пункт, входящий в несколько категорий, может претендовать на получение государственной поддержки как транспортной системы, так и системы образования и медицинского обслуживания. Очевидным является то, что поддержка со стороны государства необходима опорным населенным пунктам для того, чтобы они совершенствовались и становились удобными и комфортными не только для постоянного проживания в непростых климатических условиях, но и для развития всей Арктической зоны Российской Федерации [1].

### Климатические особенности Арктической зоны РФ

По прогнозам Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), а также по данным оценочных докладов Росгидромета, к середине XXI в. глобальная температура воздуха повысится на 1 °С, а на территории Арктической зоны РФ она вырастет на 1,9 °С. Повышение температуры в криолитозоне<sup>2</sup> может привести к деградации многолетних мерзлых пород (ММП), что повлечет за собой развитие деструктивных процессов (термодедукации, термокарста, термоэрозии, масштабного оттаивания подземных льдов в верхних горизонтах ММП) [2].

На сегодняшний день в ряде регионов Арктической зоны РФ созданы отдельные системы мониторинга многолетней мерзлоты. Все чаще и острее ставится вопрос о создании единой государственной, а также межгосударственной системы мониторинга многолетней мерзлоты. Задача такой системы заключается в фиксировании процессов таяния и замерзания мерзлоты с целью дальнейшего прогнозирования ее влияния на ландшафт. При этом неполное покрытие метеостанциями и метеозондами всей территории не позволяет в полном масштабе исследовать температурные изменения Арктической зоны РФ.

Определение «вечная мерзлота» главным образом относится к грунтам, которые остаются замерзшими на протяжении от двух и более лет. На территории РФ так называемая вечная мерзлота занимает около 60–65 % всей площади страны, территорию более 10 млн км<sup>2</sup>. На самом деле вечная мерзлота не является «вечной», она меняется циклично, в зависимости от глобальных климатических процессов. По мнению большинства экспертов в области изменения климата, главная причина текущего таяния вечной мерзлоты – это глобальное потепление, вызванное различными природными явлениями, а также человеческой деятельностью и выбросами парниковых газов (рис. 1).

<sup>2</sup> Криолитозона (от греч. *krýos* – холод, мороз, лёд; от греч. *lithos* – камень и *зона*) – часть *криосферы*, самый верхний слой земной коры, характеризующийся в течение всего года или хотя бы короткое время (но не менее суток) отрицательной температурой почв и горных пород и наличием или возможностью существования подземных льдов. Термин предложен П.Ф. Швецовым в 1955 г.

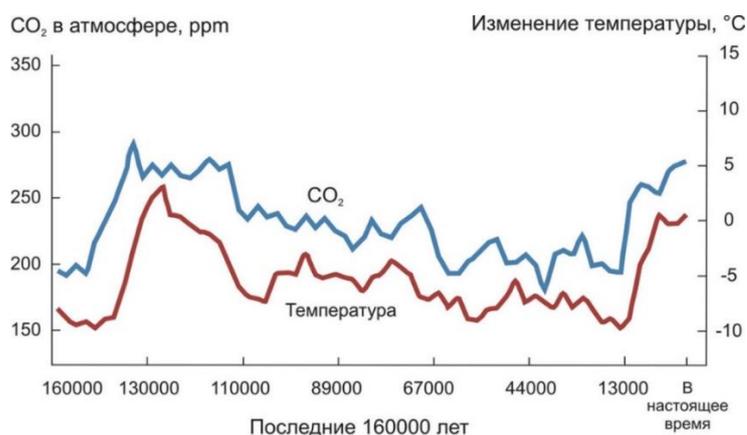


Рис. 1. Динамика концентрации углекислого газа (CO<sub>2</sub>) в атмосфере и температуры за последние 160 тыс. лет [3]

Fig. 1. Dynamics of carbon dioxide concentration in the atmosphere and temperature over the past 160 thousand years [3]

Суть глобального потепления заключается в том, что углерод попадает в атмосферу при таянии вечной мерзлоты. Далее углеродные образования способствуют повышению средней глобальной температуры и усиливают парниковый эффект. Эти явления, в свою очередь, ускоряют процессы таяния мерзлоты, что приводит к новым выбросам углекислого газа и метана в атмосферу. Циклические изменения мерзлоты сильно трансформируют природные ландшафты. Таяние льда под грунтом приводит к оседанию и эрозии почв, при этом образуются новые озера и болота, возникает риск оползней и наводнений (рис. 2).

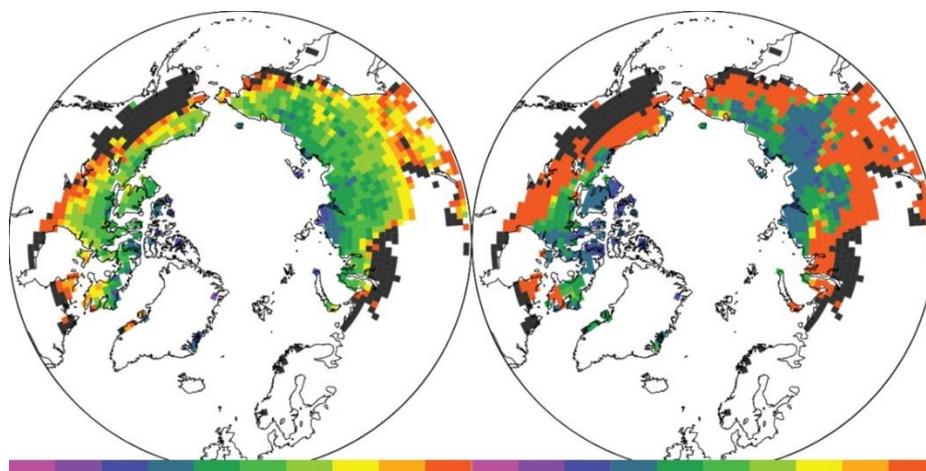


Рис. 2. Карты средней толщины активного слоя вечной мерзлоты: слева – с 1973 по 2001 г., справа – прогноз состояния в 2200 г. Красным обозначены территории, на которых мерзлота может навсегда исчезнуть. Автор Kevin Schaefer. University of Colorado Boulder

Fig. 2. Maps of the average thickness of the active permafrost layer: 1973 to 2001 (left), forecast for the year 2200 (right). Red color indicates areas in which permafrost may disappear forever. Source: Kevin Schaefer. University of Colorado Boulder

Серьезная проблема таяния вечной мерзлоты нарастает в области проектирования и градостроительства. Процессы изменения мерзлоты негативно воздействуют не только на природные ландшафты, но и на городскую и поселковую среду, а также инфраструктуру, обслуживающую эти населенные пункты. В Арктической зоне РФ для добычи природных ресурсов были построены города и поселки, создана протяженная и дорогостоящая инфраструктура, построены автомобильные и железные дороги, аэродромы и порты. Таяние мерзлоты воздействует на все это разрушительным образом [4].

Новые подходы к проектированию арктических городов должны строиться:

- с учетом циклического процесса изменения климатических параметров;
- на основе защиты и сохранения существующей инфраструктуры городов и населенных пунктов с применением современных технологий и динамических конструктивных решений;
- с использованием экологически чистых материалов;
- с учетом данных постоянного мониторинга климатических параметров, получаемых в режиме реального времени от всех стран Арктической зоны.

### Демографические особенности Арктической зоны РФ

По данным Росстата, за последние два десятилетия отмечается негативная тенденция увеличения оттока населения из Арктической зоны РФ. Последние опросы и анкетирование показывают, что северные города и регионы Арктической зоны РФ не имеют большой популярности при выборе места проживания у большинства населения нашей страны. Оттоку населения еще больше способствуют программы по переселению граждан из Арктической зоны РФ<sup>3</sup> в регионы с более благоприятным климатом.

Самой неблагоприятной территорией по демографии на протяжении последних лет можно назвать Республику Коми, где отрицательное значение миграционного эффекта в каждом отчетном периоде является максимальным. Изменение динамики в лучшую сторону можно наблюдать в Ханты-Мансийском и Ямало-Ненецком автономных округах. Произошедшие изменения численности могут быть вызваны снижением привлекательности одних арктических территорий и улучшением качества городской среды в других северных регионах как для внутренних, так и для внешних трудовых мигрантов. Переход к рыночной экономике обесценил имевшиеся льготы и преференции для

<sup>3</sup> Переселение граждан из районов Крайнего Севера и приравненных к ним местностей осуществляется в соответствии с Федеральным законом от 25.10.2002 № 125-ФЗ «О жилищных субсидиях гражданам, выезжающим из районов Крайнего Севера и приравненных к ним местностей», в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 10.12.2002 № 879 «Об утверждении положения о регистрации и учете граждан, имеющих право на получение социальных выплат для приобретения жилья в связи с переселением из районов Крайнего Севера и приравненных к ним местностей», а также Постановлением Правительства Российской Федерации от 21.03.2006 № 153 «О некоторых вопросах реализации ведомственной целевой программы «Оказание государственной поддержки гражданам в обеспечении жильем и оплате жилищно-коммунальных услуг» государственной программы Российской Федерации «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации».

жителей Крайнего Севера. Особую обеспокоенность вызывает большое количество выбытия трудоспособных молодых людей [5].

Вопросы привлечения нового или хотя бы стабилизации постоянного населения до сих пор остаются нерешенными. Все более нарастающий отток населения в центральные и южные субъекты РФ не компенсируется притоком населения (табл. 1). Изменение государственной политики в Арктической зоне РФ привело к ухудшению социально-демографического положения. Северные территории рассматриваются и используются преимущественно в качестве сырьевой базы страны. Анализ данных по численности населения показывает, что в Арктической зоне РФ оно сократилось более чем на 53 тыс. чел. [6].

Таблица 1

**Изменение численности населения районов Крайнего Севера и приравненных к ним местностей в 2005–2013 гг. [6]**

Table 1

**Changes in the Far North population and related areas in 2005–2013 [6]**

Объект анализа	Естественный миграционный прирост (+), отток (-) населения, чел.				
	2005	2007	2009	2011	2013
Районы Крайнего Севера и приравненные к ним местности	-64 458	-23 300	-23 868	-27 081	-53 374
Республика Карелия	-5559	-2497	-3288	-2901	-2530
Республика Коми	-11 411	-6453	-7389	-9378	-8582
Республика Саха (Якутия)	-1189	+606	-406	-2399	-777
Республика Тыва	+832	+2180	+3116	+1215	+1301
Камчатский край	-2908	-1454	-1294	-1503	-690
Архангельская область	-13 173	-8310	-7587	-11 357	-10 510
Магаданская область	-3116	-2710	-1721	-2049	-2045
Мурманская область	-8333	-6040	-5780	-6129	-9343
Сахалинская область	-6158	-2667	-3686	-1337	-2275
Ханты-Мансийский автономный округ – Югра	+8390	+16 666	+18 654	+24 104	+13 325
Ямало-Ненецкий автономный округ	+3980	+4157	+2875	+11 633	-1433
Чукотский автономный округ	-181	-221	-929	+643	-225

Рассмотрим, насколько критично сокращение численности населения для Арктической зоны РФ. Проанализировав состояние этого же вопроса на северных территориях Канады или Скандинавии, отметим, что населенные пункты всегда были здесь малочисленными. По состоянию на 2021 г. численность населения Северной Канады составляла чуть более 118 тыс. чел., которые проживали на территории, по площади сопоставимой с территорией всей Западной Европы. Стоит отметить, что территория Северной Канады богата полезными ископаемыми, но в большинстве случаев их добыча считается нерентабельной и разрушительной для окружающей среды [7].

Не менее острым остается вопрос неприспособленности коренных малочисленных народов Севера (КМНС) к современным экономическим условиям. Традиционные виды хозяйственной деятельности, которыми они занимаются, не могут конкурировать с крупными предприятиями ни по производимому объему продукции, ни по срокам поставок, ни по технологиям переработки сырья. Непрерывное освоение природных ресурсов Арктической зоны РФ в промышленных объемах также негативно сказалось на возможности ведения традиционных видов хозяйственной деятельности малочисленных народов Крайнего Севера (табл. 2).

Таблица 2

**Динамика численности и темпы роста 9 самых крупных по численности КМНС, городское население, чел. [6]**

Table 2

**Dynamics of population and growth rate of 9 largest indigenous peoples, urban population [6]**

Народ	1989		2002		2010		2002 к 1989, %	2010 к 2002, %	2010 к 1989, %
	Чел.	%	Чел.	%	Чел.	%			
Коряки	2564	28,7	2755	31,6	2917	36,7	107,4	105,9	113,8
Манси	3779	45,6	5919	51,8	7028	57,3	156,6	118,7	186,0
Нанайцы	4663	39,2	3702	30,4	3518	29,3	79,4	95,0	75,4
Ненцы	5840	17,1	7844	19,0	9543	21,4	134,3	121,7	163,4
Ханты	6636	29,8	9924	34,6	11879	38,4	149,5	119,7	179,0
Чукчи	2109	14,0	3402	21,6	3808	23,9	161,3	111,9	180,6
Шорцы	11572	73,5	9939	71,1	9353	72,6	96,7	94,1	80,8
Эвенки	6088	20,4	8576	24,1	10141	26,4	140,9	118,2	166,6
Эвены	4258	25,0	6116	32,1	7929	36,3	143,6	129,6	169,8
<b>Итого</b>	<b>47509</b>	<b>29,1</b>	<b>58177</b>	<b>31,2</b>	<b>66116</b>	<b>33,6</b>	<b>122,5</b>	<b>113,6</b>	<b>139,2</b>

С целью сохранения идентичности малочисленных народов Севера подходы к освоению Арктической зоны РФ должны быть скорректированы. Основой для самоопределения, гарантирующей права коренных малочисленных народов, является статья 69 Конституции РФ, согласно которой коренные малочисленные народы были выделены в обособленную группу народов для обеспечения их защиты со стороны государства [8]. Они обладают особым статусом и имеют права на ряд льгот, имеющих законодательное закрепление. К сожалению, на практике помощь от государства имеет и негативное влияние. Культура и быт коренных народов Севера под влиянием глобального прогресса претерпели существенную трансформацию. Многие так называемые «блага цивилизации» заменили традиционный уклад жизни малочисленных народов, что, в свою очередь, повлияло на демографическую ситуацию в Арктической зоне РФ в целом.

В стремлении сохранить или увеличить численность населенных пунктов Арктической зоны РФ недопустимо упускать из вида интересы малочис-

ленных коренных народов. По мнению автора, новые подходы к проектированию арктических городов должны строиться:

- на улучшении качества городской среды, а не на количественных показателях изменения демографии;
- на сохранении идентичности с учетом культурно-бытовых особенностей народов Крайнего Севера;
- на сбалансированном соотношении работников, приезжающих на временные вахтовые заработки, и обслуживающих их граждан.

### Туристические аспекты проектирования арктических городов

На совещании по развитию опорных населенных пунктов Арктической зоны РФ президент России В.В. Путин определил роль туризма одной из «важнейших системных задач». По мнению президента РФ, «развитие туризма в Арктической зоне имеет просто колоссальный потенциал». Однако для полноценного развития туристической отрасли в регионе, по его словам, «предстоит совершенствовать индустрию гостеприимства, предлагать интересные маршруты и услуги, а также развивать города и поселки в комплексе» (рис. 3) [9].

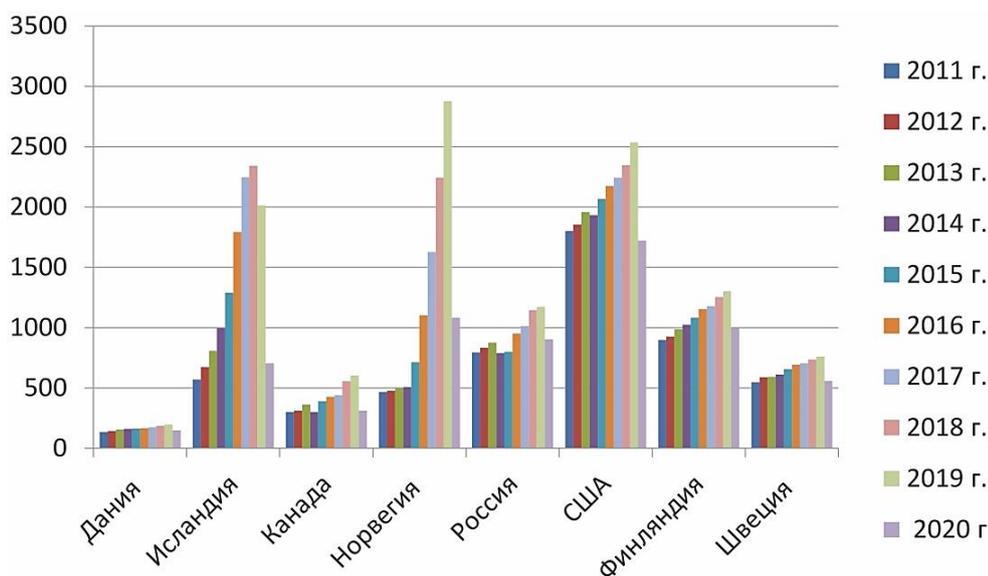


Рис. 3. Динамика туристического потока в арктических регионах, тыс. чел.<sup>4</sup>  
 Fig. 3. Dynamics of the tourist flow in Arctic regions, thousand people

Привлекательность Арктической зоны РФ строится, прежде всего, на особенностях географического положения, ландшафтно-рекреационном потенциале, естественно-природных условиях, этнографии и культуре коренных народов Севера. При этом экологические исследования отмечают усиление

<sup>4</sup> Мировой атлас данных // Мировая и региональная статистика, национальные данные, карты и рейтинги. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/arkicheskiy-turizm-mezhdunarodnyu-i-natsionalnuu-aspekty-problemy-i-osobnosti-razvitiya/viewer>

негативного воздействия, оказываемого на природу Арктической зоны в результате растущего увеличения количества посещений. Таким образом, становится все более актуальной проблема совмещения целесообразности экономического развития с экологической безопасностью в контексте устойчивого развития арктических территорий.

Многочисленные исследователи отмечают, что решающую роль в устойчивом развитии туризма в Арктической зоне РФ играет взаимодействие между местными органами управления и бизнесом. Следует отметить, что на сегодняшний день потребление туристических продуктов Российской Арктики доступно в основном для состоятельных туристов ввиду отсутствия инфраструктуры для людей среднего и ниже среднего достатка. Также, несмотря на глобальное потепление, ключевым фактором непривлекательности территорий Арктической зоны РФ остаются достаточно продолжительные суровые климатические условия.

Наиболее популярными видами туризма в Арктической зоне РФ являются: этнокультурный, событийный, экологический, спортивный и экстремальный [10]. Туроператоры предлагают: знакомство с традиционным образом жизни коренных народов, морские круизы, рафтинг, катание на лодках и каноэ, рыбалку и охоту, лыжные и пешеходные маршруты. Самыми дорогостоящими являются морские круизные туры. Цены на них могут варьироваться от 0,7 до 2,5 млн руб. и более в зависимости от степени комфортности, сложности маршрута и экскурсионной программы [11].

Помимо перечисленных видов туризма, стоит отметить интерес к популярным регионам, как наименее доступным «нетронутым» территориям. К уникальным ландшафтам Арктической зоны РФ туристов влечет интерес постичь что-то новое, эксклюзивное, посетить места, где еще осталась возможность максимально отойти от цивилизации, найти для себя уединение и тишину. Как бы это парадоксально ни звучало, но слишком бурное развитие туристической отрасли в Арктической зоне РФ может нанести непоправимый ущерб уникальности этого региона, как, например, сейчас это происходит с туристическими направлениями степного и горного Алтая. Границы так называемых «нетронутых» и «диких» территорий Республики Алтай отодвигаются все дальше на юг, к Монголии.

Новые подходы к проектированию арктических городов должны строиться:

- на развитии туристической отрасли с учетом климатических и этнографических особенностей Арктической зоны РФ;
- на разнообразии и уникальности арктического туризма;
- на особом бережном отношении к естественным природным ландшафтам Крайнего Севера.

### **Заключение**

Специфика городов Арктической зоны РФ заключается в том, что населенные пункты по-прежнему труднодоступны с транспортной точки зрения для других соседних регионов с более благоприятным климатом. Города в Арктической зоне территориально расположены очень редко, и потому каждый из них по сути является опорным или базовым. Определяя перспективы

развития арктических городов, прежде всего нужно создавать транспортную доступность и информационную мобильность опорных населенных пунктов.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что при проектировании арктических городов стандартные подходы при создании в них комфортной городской среды не могут быть применены. Так, в экстремальных условиях невозможно длительное время находиться на открытом воздухе, например в благоустроенных парках: в зимний период – по причине преобладания низких температур и холодного ветра, летом – из-за большого количества комаров и гнуса. Комфортные условия для круглогодичного времяпрепровождения можно создать только в закрытых или полузакрытых многофункциональных комплексах.

Стратегия социально-демографического развития Арктической зоны РФ должна учитывать специфику малочисленных коренных народов. Бессмысленно наращивать темпы строительства жилья в северных городах на фоне снижения их численного состава. Упор необходимо делать на качественные показатели, на уникальность и незаменимую роль каждого населенного пункта. Большинство из них останутся центрами обеспечения освоения крупных месторождений, какие-то города будут выполнять функцию транспортно-логистических центров, а какие-то – научно-информационных центров.

Относительно туризма в Арктической зоне РФ в настоящее время рано говорить об этом как об отдельной самостоятельной отрасли в регионе. Для того чтобы туризм в Арктике стал не только экстремальным, но и достаточно доступным и комфортным, необходим существенный прорыв в сфере обслуживания. Гостиничные комплексы должны стать доступнее и разнообразнее. Не исключено, что какой-то опорный город по эксклюзивности проектов сможет в некотором смысле повторить «успех Дубая», привлекая не столько естественно-природным потенциалом арктических территорий, сколько созданием «невозможного» в суровых климатических условиях.

Таким образом, к проектированию арктических городов нужны совсем иные подходы, поскольку многие положения современной урбанистики основаны на представлениях о городской среде и принципах проектирования, которые невозможно применить к Арктической зоне РФ. По мнению Надежды Замятиной<sup>5</sup>, арктическим городам важно развивать функции, связанные со сферой знаний и информации. Арктическим городам ничего не остается, кроме как стать «наукоградами поневоле». В них должны создаваться стратегические, научно-исследовательские, информационно-аналитические, сервисные и административные функции [12].

Крупные военные базы и научно-исследовательские комплексы, оснащенные всем необходимым для осуществления мониторинга за изменением климата не только Российского Севера, но и планеты в целом, – это один из способов успешной реализации государственной стратегии освоения Арктической зоны РФ. Арктические города будущего должны учитывать цикличность изменения климата и «уметь» подстраиваться под новые условия. Ста-

<sup>5</sup> Надежда Замятина – специалист в области социально-экономической географии, ведущий научный сотрудник МГУ имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук.

новится очевидным, что стране нужны экспериментальные проекты и специалисты, готовые воплотить их в жизнь. Не следует забывать простую закономерность: то, что сегодня кажется невозможным, через какое-то время становится обыденным.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Данькин М.А., Замятина Н.Ю., Зайцев А.А., Никитин Б.В., Потураева А.В., Ивлиева О.Д.* Опорные населенные пункты Российской Арктики : материалы предварительного исследования / АНО «Информационно-аналитический центр Государственной комиссии по вопросам развития Арктики», АНО «Институт регионального консалтинга». – [б. м.] : [б. и.], 2022. 246 с.
2. *Любушин А.А.* Циклические вариации климата: анализ данных, сценарии, прогноз // Глобальные экологические процессы : мат. Межд. научн. конф. / под ред. В.В. Снакина. Москва : Academia, 2012. С. 66–71.
3. *Вайцеккер Э., Ловинс Э., Ловинс Л.* Фактор четыре (затрат половина, отдача двойная). Москва : Academia, 2000. 400 с.
4. *Шполянская Н.А.* Вечная мерзлота и глобальные изменения климата. Москва ; Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика : Ижевский институт компьютерных исследований, 2010. 200 с.
5. *Попова Л.А., Сукнева С.А.* Демографическое развитие Республики Коми и Республики Саха (Якутия): общее и особенное // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2012. № 4. С. 112–119.
6. *Матвеев А.С.* О демографических факторах развития Севера Российской Федерации // Проблемы Севера и Арктики Российской Федерации. 2006. № 4. С. 3–11.
7. *Дзюбан В.В.* Арктическая политика Канады в XXI веке // Архонт. 2020. № 1 (16). С. 9–12.
8. *Российская Федерация. Законы.* Конституция Российской Федерации : принята всенародным голосованием 12 декабря 1993 г. с изменениями, одобренными в ходе общероссийского голосования 01 июля 2020 г. // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://www.pravo.gov.ru> (дата обращения: 31.12.2023).
9. *Болдырева С.Б.* Влияние туризма на социально-экономическое развитие региона: обобщение российского и зарубежного опыта // Региональная экономика: теория и практика. 2018. № 5 (452). С. 972–988.
10. *Бабкин А.В.* Специальные виды туризма. Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. 78 с.
11. *Бертош А.А.* Арктический туризм: концептуальные черты и особенности // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. Т. 10. № 7–17. С. 169–180.
12. *Замятина Н.Ю.* Почти каждый город Арктики – опорный // GoArctic. URL: <https://goarctic.ru/society/nadezhda-zamyatina-pochti-kazhdyy-gorod-arktiki-opornyy> (дата обращения: 31.12.2023).

## REFERENCES

1. *Dankin M.A., Zamyatina N.Yu., Zaitsev A.A., Nikitin B.V., Poturaeva A.V., Ivlieva O.D.* Information and Analytical Center of the State Commission for the Development of the Arctic. Supporting settlements of the Russian Arctic, 2022. 246 p. (In Russian)
2. *Lyubushin A.A.* Cyclic climate variations: Data analysis, scenarios, forecast. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Global Environmental Processes'*, V.V. Snakina, Ed., Moscow: Academia, 2012. Pp. 66–71. (In Russian)
3. *Weizsäcker E., Lovins A.B., Lovins L.H.* Factor four: Doubling wealth, halving resource use: The new report to the Club of Rome. Moscow: Academia, 2000. 400 p. (Russian translation)
4. *Shpolyanskaya N.A.* Permafrost and global climate change. Moscow, Izhevsk: Regular and chaotic dynamics, Izhevsk Institute of Computer Research, 2010. 200 p. (In Russian)
5. *Popova L.A., Sukneva S.A.* Demographic development of the Komi Republic and the Republic of Sakha (Yakutia): General and special. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN.* 2012; (4): 112–119. (In Russian)

6. *Matveev A.S.* Demographic factors in the development of the North of the Russian Federation. *Problemy Severa i Arktiki Rossiiskoi Federatsii*. 2006; (4): 3–11. (In Russian)
7. *Dzyuban V.V.* Arctic policy of Canada in the 21st century. *Archon*. 2020; 1 (16): 9–12. (In Russian)
8. Constitution of the Russian Federation. Available: [www.pravo.gov.ru](http://www.pravo.gov.ru) (accessed December 12, 2023). (In Russian)
9. *Boldyreva S.B.* The influence of tourism on socio-economic development of the region: Russian and foreign experience. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika*. 2018; 5 (452): 972–988. (In Russian)
10. *Babkin A.V.* Special types of tourism. Rostov-on-Don: Feniks, 2008. 78 p. (In Russian)
11. *Bertosh A.A.* Arctic tourism: Conceptual features and features. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*. 2019; 10 (7–17): 169–180. (In Russian)
12. *Zamyatina N.Yu.* Almost every city in the Arctic is supporting. Available: <https://goarctic.ru/society/nadezhda-zamyatina-pochti-kazhdy-gorod-arktiki-oporny> (accessed December 12, 2023).

#### **Сведения об авторе**

*Ремарчук Сергей Михайлович*, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [greyremarchuk@gmail.com](mailto:greyremarchuk@gmail.com)

#### **Author Details**

*Sergey M. Remarchuk*, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, [greyremarchuk@gmail.com](mailto:greyremarchuk@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 08.02.2024  
Одобрена после рецензирования 20.02.2024  
Принята к публикации 15.03.2024

Submitted for publication 08.02.2024  
Approved after review 20.02.2024  
Accepted for publication 15.03.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 2. С. 48–60.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (2): 48–60.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 728.05:36(100)

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-48-60

EDN: CBVHJZ

## ЭКОНОМИЧЕСКИ ДОСТУПНОЕ ЖИЛИЩЕ В ЕВРОПЕ, АМЕРИКЕ И РОССИИ В V–XVIII ВВ.

**Евгений Леонидович Огиенко**

*Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия*

**Аннотация.** *Актуальность.* В статье рассматриваются отдельные вопросы генезиса и развития концепции экономически доступного жилища, сложившейся в России, Европе и Америке в V–XVIII вв. Экономически доступное жильё играет важную роль в формировании качества жизни и социальной интеграции. Истоки доступного жилища можно воссоздать из истории европейской цивилизации и христианской аксиологии, где были определены начала общинной среды обитания и создания концепции жилого комплекса для бедных.

Статья посвящена четырём разновидностям подобных жилищ. Это бурсы (V–XV вв.), богадельни (X–XI вв.), комплекс Футгерай (XVI в.) и жилые дома шейкеров (XVII–XVIII вв.). Рассмотрены генеральные планы, решения планов и фасадов. Указаны категории населения, для которых предназначались данные жилища, сроки их проживания, роль домовладельцев.

*В результате* исследования отмечено, что доступные жилища строились по инициативе частных лиц. На развитие жилищной ситуации в отдельных странах оказывает влияние как проводимая их правительствами жилищная политика, так и ряд внешних факторов, таких как социально-экономическая и демографическая ситуация, политические, административно-правовые факторы и т. д. Эти внешние переменные вместе с жилищной политикой определяют роль, цели и характеристики жилища. Определены типы объектов жилища по следующим параметрам: период и срок проживания, тип владельцев, категория проживающих, вид деятельности.

**Ключевые слова:** бурса, богадельня, комплекс Футгерай, жилые дома шейкеров

**Для цитирования:** Огиенко Е.Л. Экономически доступное жилище в Европе, Америке и России в V–XVIII вв. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 48–60. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-48-60. EDN: CBVHJZ

ORIGINAL ARTICLE

## AFFORDABLE HOUSING IN RUSSIA, EUROPE AND USA IN THE 5–18th CENTURIES

**Evgeniy L. Ogienko**

*Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia*

**Abstract.** The article discusses problems of concept genesis and development of affordable housing in Russia, Europe, and the USA in the 5–18th centuries. Affordable housing plays an

important role in the quality of life and social integration. Affordable housing originates from the history of European civilization and Christian axiology, where communal living and housing for the poor are determined.

*Purpose:* The following types of housing are studied: bursas (5–15th centuries), almshouses (10–11th centuries), Fuggerei (16th century), Shaker (17–18th centuries) houses. Their master plans and facades are studied herein. Population categories for which housing is assigned are indicated as well as the period of residence and owners.

*Research findings:* Affordable housing is built by private individuals. The housing development is influenced by the policy pursued by their governments and external factors such as socio-economic, demographic, political, administrative, legal conditions, which determine the role, goals and characteristics of housing. Housing types are determined according by the following parameters: residence duration, owners, residents, and their activities.

**Keywords:** bursae, Fuggerei complex, Shaker houses, almshouses

**For citation:** Ogienko E.L. Affordable housing in Russia, Europe and USA in the 5–18th centuries. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 48–60. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-48-60. EDN: CBVHJZ

## Введение

Проблема доступности недорогого, экономически<sup>1</sup> доступного жилища считается одним из ключевых вопросов обеспечения благополучия и стабильности людей во всем мире [1]. Анализ современной ситуации с доступным жилищем следует рассматривать в контексте развития европейской цивилизации и культурного наследия.

Целью исторических рассуждений является сравнение и обращение к предыдущему опыту.

Бурса (Bursae) – университетское общежитие, предназначенное для проживания студентов и преподавателей на период учёбы или работы. Одной из ключевых целей бурс было создание интеллектуальной и образовательной среды для студентов и преподавателей. Первые временные жилища для малообеспеченных студентов были построены в Европе в V–XV вв. Студенты и ученые путешествовали по Европе, направляясь в разные университеты, чтобы учиться и преподавать. Во время странствий эти люди останавливались в ночлежках или монастырях под названием «бурса» [2]. Им разрешалось оставаться на несколько дней – бурсы были временным жилищем для студентов, преподавателей и учеников [3]. Только столетия спустя получили они более широкое распространение для молодежи. Бурсы во Франции и Германии в конце XVIII в. существовали за счет благотворительных фондов, а позже содержались за счет средств студентов. Проживавшие здесь студенты были под жестким наблюдением: они не могли выходить из общежития без разрешения, должны были носить определённую одежду и т. п. Общежития того периода делятся на студенческие, аспирантские и для стажеров. Они разме-

<sup>1</sup> Экономически доступное жилище: 1) общественное жилище, спроектированное и построенное согласно минимально приемлемому жилищному стандарту для снижения стоимости до уровня, посильного малоимущим арендаторам; = poor housing, lowincome housing, social housing 2) любое жилище, в том числе и рыночное, приобретаемое или арендуемое домохозяйством на условиях экономической доступности, – за счёт покрытия части стоимости специальными «жилищными пособиями» [1].

щались рядом с учебными заведениями и ведомствами. Помещения имели коридорную структуру, во многом сходную с современной. На каждом этаже были предусмотрены одна общая кухня и санузел. Оборудование в комнатах проживания было минимальным. 9 августа 1623 г. австрийский император Фердинанд II приказал построить в Вене для местного общества иезуитов бурсу площадью около 4800 м<sup>2</sup>. Это здание было рассчитано на 400 учеников (рис. 1). Помимо бурсы, здесь были предусмотрены церковь, библиотека, обсерватория, трапезная, классы латинской школы и конюшни (рис. 2).



Рис. 1. Бурса Академического колледжа Венского общества иезуитов. Вена, Баккерштрассе, 20<sup>2</sup>  
 Fig. 1. Bursa "Academic College of the Vienna Jesuit Society." Vienna, Bakkerstrasse 20



Рис. 2. Генеральный план, авторы: Рихард Пергера и Фридмунд Хюбер. Средневековые университетские здания и бурсы, 1985 г. Район Стубентора с университетскими зданиями и цехами<sup>3</sup>

Fig. 2. Master plan by Richard Pergera and Friedmund Huber. Medieval university buildings and workshops, 1985. Stubentor area with university buildings and workshops

<sup>2</sup> URL: <https://www.quermania.de/baden-wuerttemberg/tuebingen/bursa.php>

<sup>3</sup> URL: <https://www.habsburger.net/en/chapter/bursen-and-koderien-student-hostels-middle-ages>

В России строились аналогичные общежития. Как правило, они размещались при духовных семинариях и училищах. Первая бурса в Российской империи была возведена для Киевской духовной академии (рис. 3), в которой юные послушники изучали богословие, риторику и философию. В середине XVII в. митрополит Петр Могила велел переделать этот дом. Бурса Киевской духовной академии представляет собой двухэтажное здание с коридорной планировочной структурой, рассчитанное на 500 учеников. Условия проживания в бурсах были далеко не комфортные. Жилые комнаты площадью 12–20 м<sup>2</sup> были рассчитаны на 4 человек. В комнатах отсутствовала мебель, часто они находились в антисанитарном состоянии. Общение с учениками было жестким, тем часто приходилось голодать из-за скудного финансирования бурсы. В конце XVII в. из-за разногласий с Речью Посполитой произошел роспуск казачьих полков. В результате воспитанники академии перестали получать денежную помощь. Чтобы обеспечить себе достойное существование, ученики отправлялись в город, где выступали на улицах с речами, стихами, пьесами и т. п.

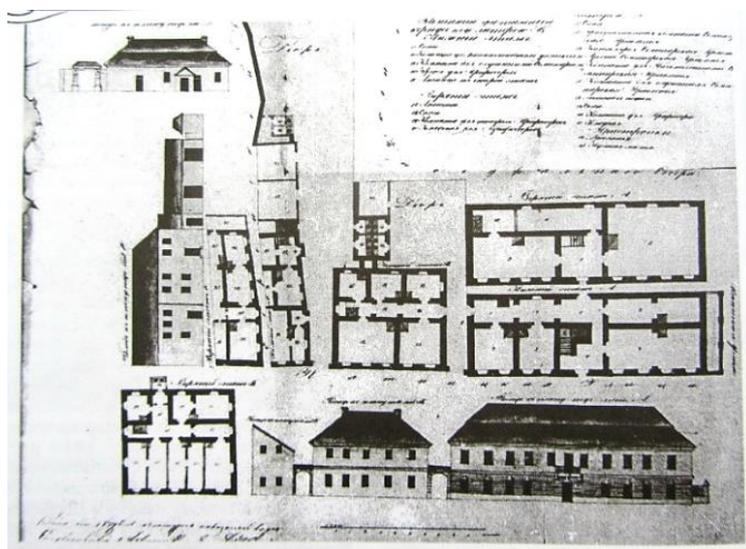


Рис. 3. Бурса. Киевская духовная академия<sup>4</sup>  
Fig. 3. Bursa. Kyiv Theological Academy

По инициативе короля Ательстана (X в.) в бывшей римской крепости английского города Йорка появились богадельни. В период раннего Средневековья, после решительной победы над викингами, этот город стал важным торговым центром [4]. Первая богадельня в Англии была основана в 936 г. н. э. В средневековом обществе все верующие христиане были обязаны помогать бедным, подавая милостыню в виде еды или денег. Епископ святой Освальд создал святилище, где братья могли «служить больным, хоронить мертвых, выручать бедных и приютить путников, прибывших после того, как городские во-

<sup>4</sup> URL: <https://kamiynec.livejournal.com/50024.html>

рота закрылись ночью» [4]. Считается, что старейшим из существующих фондов богадельни была больница Святого Освальда в Вустере, основанная в 990 г. (рис. 4). Она представляла собой 3-этажный блокированный дом жилой площадью около 107 м<sup>2</sup>. В каждом жилом блоке проживало 4–6 человек.

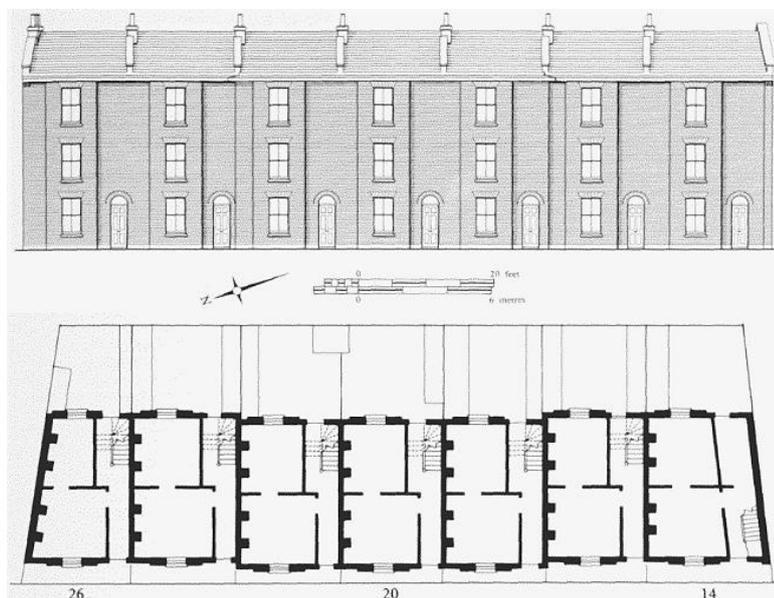


Рис. 4. Богадельня Святого Освальда в Вустере<sup>5</sup>

Fig. 4. St. Oswald's Almshouse in Worcester

Первое упоминание о богадельне на Руси приходится на к. X – н. XI в., когда князь Владимир составлял церковный устав. Именно монастыри на свои средства строили богадельни для бездомных, путешественников и больных. Некоторые из этих построек представляют собой великолепные здания с интересными декоративными деталями (статуи, надписи, гербы, башни с часами, солнечные часы). Во многих монастырях часовни сохранили свой внешний облик и функциональное назначение – в них проводятся регулярные службы.

Скулябинская богадельня – двухэтажное кирпичное здание площадью 621,3 м<sup>2</sup>, в котором проживало около 50 человек. Богадельня построена в XVIII в. в г. Вологде на средства, полученные от купца Николая Скулябина. Здание выполнено в стиле раннего классицизма. На первом этаже были размещены склады и торговые лавки, выше – жилые помещения. Каждый фасад богадельни выполнен по-своему. Особый акцент был сделан на главном фасаде, украшенном шестиколонным ионическим портиком и треугольным фронтоном. В Скулябинской богадельне имелись часовни, на сводах которых были изображены сюжеты из Евангелия.

В богадельне Сорокиной была использована коридорно-центрическая планировочная схема (рис. 5).

<sup>5</sup> URL: <https://tornoderodas.com.br/welcome-to-a-guided-tour-of-the-18th-century-zz-mNwmvpsO>

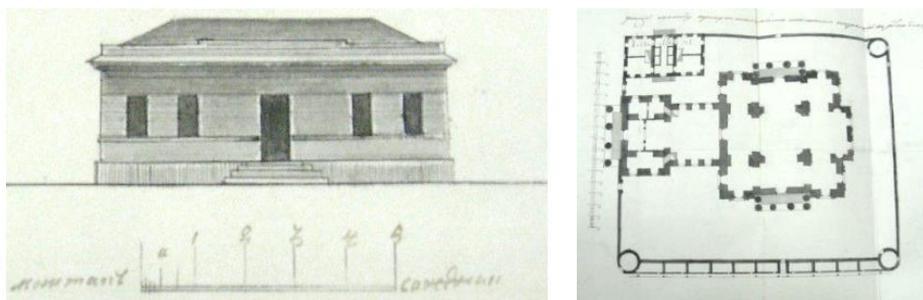


Рис. 5. Богательня Сорокиной<sup>6</sup>  
Fig. 5. Sorokina's almshouse

Многие российские богадельни функционируют и в настоящее время. Их восстанавливают и расширяют, обеспечивают всем необходимым (отоплением, ванными комнатами и кухнями).

В Германии в 1530-х гг. появился квартал Фуггерай, названный в честь Якоба Фуггера из Аугсбурга, который в те времена был богатейшим финансистом Габсбургской империи, банкиром Ватикана и трейдером (рис. 6).

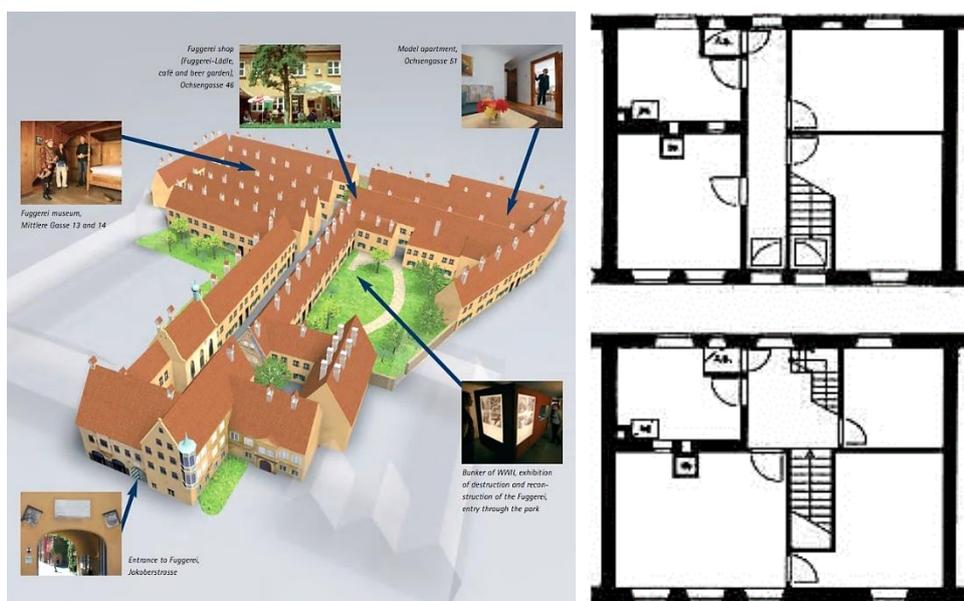


Рис. 6. 3D-модель, план дома и фасад Фуггерай в Аугсбурге, Бавария, XVI в.<sup>7</sup>  
Fig. 6. 3D model, house plan and facade of the Fuggerei complex in Augsburg, Bavaria. 16th century

Когда церковь начала продажу индульгенций, народное возмущение привело к протестантским реформам. В этот напряженный момент Я. Фуггер

<sup>6</sup> URL: <https://ssaфро-n.livejournal.com/31551.html>

<sup>7</sup> URL: <https://www.stadtbaukunst.org/francais/lenseignement-durbanisme/seminaires/inklusive-stadt/index.html?tid=472&bid=43&btid=45>

в 1514–1523 гг. на свои деньги построил жилой квартал нового типа. Его назвали «Фуггерай», и он принципиально отличался от прежних жилищ для бедных, поскольку имел значительно большую площадь застройки по сравнению с богадельнями. Комплекс Фуггерай включал в себя 67 домов с 147 квартирами, в которых могли разместиться сотни постояльцев. Комплекс был запроектирован архитектором Томасом Кребсом для «достойных» нуждающихся горожан, которые активно работали, но заработанных денег не хватало на покупку более комфортного жилья. Арендная плата в Фуггерэе составляла один рейнский гульден (совр. евро) в год (половина среднего показателя по городу) плюс две молитвы в день за душу Якоба Фуггера. С 1520 г. по настоящее время этот уникальный жилой комплекс функционирует и продолжает поддерживаться благотворительным фондом Фуггера.

Фуггерай считается одним из старейших доступных жилых комплексов в мире. Состоит из блокированных жилых домов этажностью 2–5 этажей, площадь дома – 40–60 м<sup>2</sup>. Жилища комплекса постоянно заселены с момента его постройки. В настоящее время комплекс стал живым музеем с одной выставочной квартирой, демонстрирующей особенности повседневного быта того времени [4, 5]. Во время Второй мировой войны комплекс был серьезно поврежден, однако вскоре реконструирован в соответствии с первоначальным видом (рис. 7).



Рис. 7. Фасад дома Фуггерай<sup>8</sup>  
Fig. 7. Facade of the Fuggerai house

<sup>8</sup> URL: <https://assemblepapers.com.au/2020/04/06/the-fuggerei-500-years-and-counting/>

В Англии в XVIII в. доступное жилище предлагали общинные поселения шейкеров. «Движение Шейкер», или «Объединенное общество верующих во Второе Пришествие Христа» – христианское религиозное движение, которое было основано в Англии в 1774 г. Энн Ли (также известной как Мать Энн) [6, 7, 8, 9, 10]. После смерти своего четвертого ребенка Ли утверждала, что у нее было несколько видений от Бога, и ее последователи верили, что она была женским компонентом духа Христа и олицетворяла Второе явление Христа на земле. В 1772 г. у Анны было еще одно видение, в котором было сказано, что местом проживания общины должна стать Америка. В 1774 г. община шейкеров купила земли в США. Семья могла бесплатно жить в фахверковом 3-этажном доме площадью 648 м<sup>2</sup>. Для этого все ее члены обязаны были следовать четырем основным принципам: жить сообща, соблюдать целомудрие, регулярно исповедовать грехи, отделить себя от внешнего мира. Шейкеры были за физическое равенство, т. е. равенство, которое также может быть предоставлено нехристианам и представителям других рас, присоединившимся к данным общинам [4, 11].

Архитектура шейкеров характеризуется простотой внешнего и внутреннего пространства; эти характеристики сделали их «первыми минималистами» и «модернистами» [12, 13]. Мебель в жилищах была простых форм и пропорций, обычно изготавливалась из клена, березы, каштана, ореха или медовой сосны. Шейкеры сами делали всю мебель, включая стулья, кровати, письменные столы, книжные шкафы, умывальники, сундуки, скамейки, часы, табуреты, коробки для шитья, щетки, метлы и многое другое. Простота провозглашалась ключевой ценностью, а изоляция – главным стремлением в попытке создать совершенное общество. Торговля шейкеров была сосредоточена на местных рынках и фермах. Спрос на товары исходил от основного американского потребителя, который в эпоху растущей индустриализации и массового производства начал желать продукции, напоминающей американское прошлое.

Поселения шейкеров (рис. 8) представляли собой деревни. Хорошо продуманное планировочное решение территории поселения шейкеров позволяло осуществлять постоянный контроль над жителями, а мужчины, женщины и дети формировались в полноправных членов данного сообщества. Каждый член общины имел определенные задачи, выполнение которых способствовало возникновению излишков сельскохозяйственных и материальных товаров, производимых для поддержки жилого комплекса и его сообщества.

Поселения обычно состояли из жилых помещений, танцевальных залов, сельскохозяйственных угодий, садов, амбаров, церкви, кухонь и школ [9]. Композиционным центром деревень шейкеров была общественная церковь, вокруг которой располагались жилые дома и хозяйственные постройки (рис. 8, 9). Каждая деревня обычно делилась на три «семьи» от 30 до 100 человек. Центральной и самой значительной была «Церковная семья». Две другие семейные единицы, «Север» и «Юг», были названы в честь их географического положения относительно центрального ядра. Обычно семейные постройки располагались линейно на расстоянии около 1,2 км друг от друга. Дом для собраний, офис и жилище первых старейшин располагались в комплексе «Церковной семьи». Другие дома и некоторые мастерские обычно размещались вдоль главной дороги, хозяйственные постройки (амбары и пр.) – в центральной части.

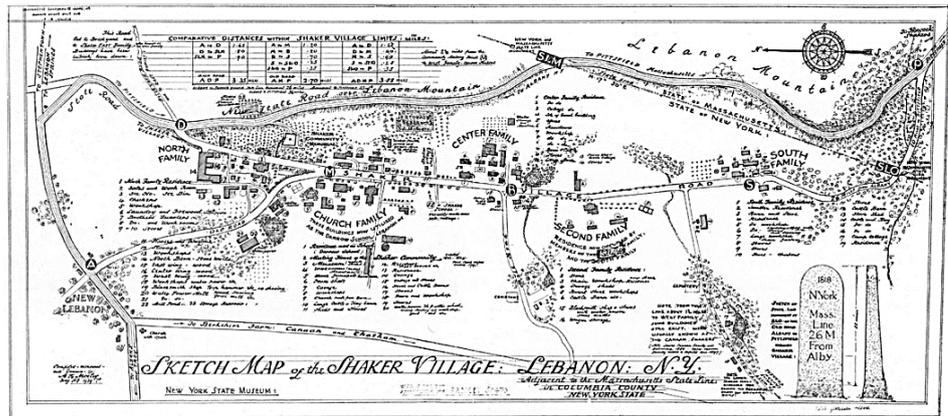


Рис. 8. Эскизная карта деревни Шейкер: Нью-Йорк, 1939 г. Автор А.К. Мозли<sup>9</sup>  
 Fig. 8. Sketch map of Shaker Village: New York, 1939. Author: A.K. Moseley

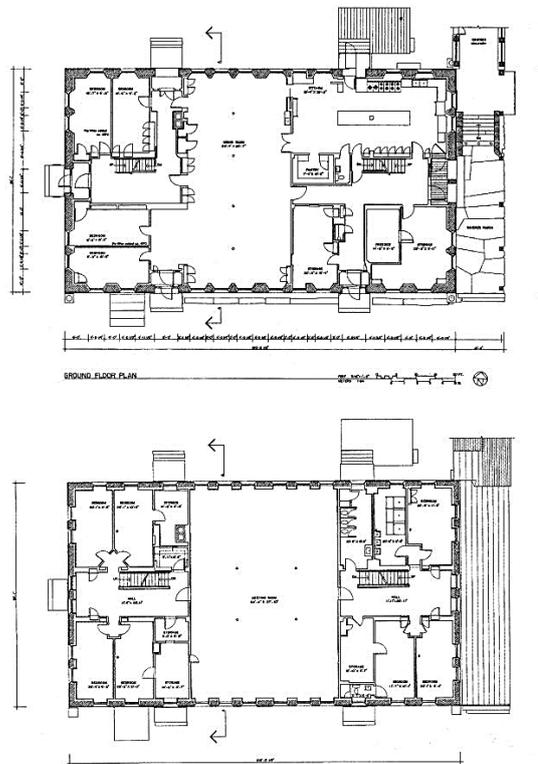


Рис. 9. План первого этажа большого каменного жилого дома, Энфилд, 1978 г. Автор Патрик М. Беркхарт<sup>10</sup>  
 Fig. 9. Ground floor plan of large stone residential building, Enfield, 1978. Author: Patrick M. Burkhardt

<sup>9</sup> URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Architecture-of-Control%3A-Shaker-Dwelling-Houses-Nicoletta/a53d849bc5005e322c50fb34cc458f65f306ec56>

<sup>10</sup> Там же

По мере роста населения деревень росли их функции и задачи. Требовались специализированные здания, такие как кожевенные, бондарные и прядильные мастерские. Ранние постройки возводились из древесины и были окрашены в желтый цвет с красными гонтовыми крышами. Дом собраний всегда был белым. Для строительства домов также использовали гранит и мрамор. Архитектурные элементы (дверные и оконные рамы, перемычки и дымоходы, лестницы и фурнитура) отличались четкими линиями и лаконичными формами без декоративных элементов. Здания, предназначенные для мужчин и женщин, такие как молитвенные дома, жилища, имели отдельные входы и лестницы. Интерьеры молитвенных домов включали большие залы, в которых проходили религиозные танцы. Жилища включали общие комнаты на первом этаже и отдельные спальни на этажах выше (рис. 10). В больших жилищах были предусмотрены внутренние окна, чтобы в темные внутренние комнаты проникал естественный свет.

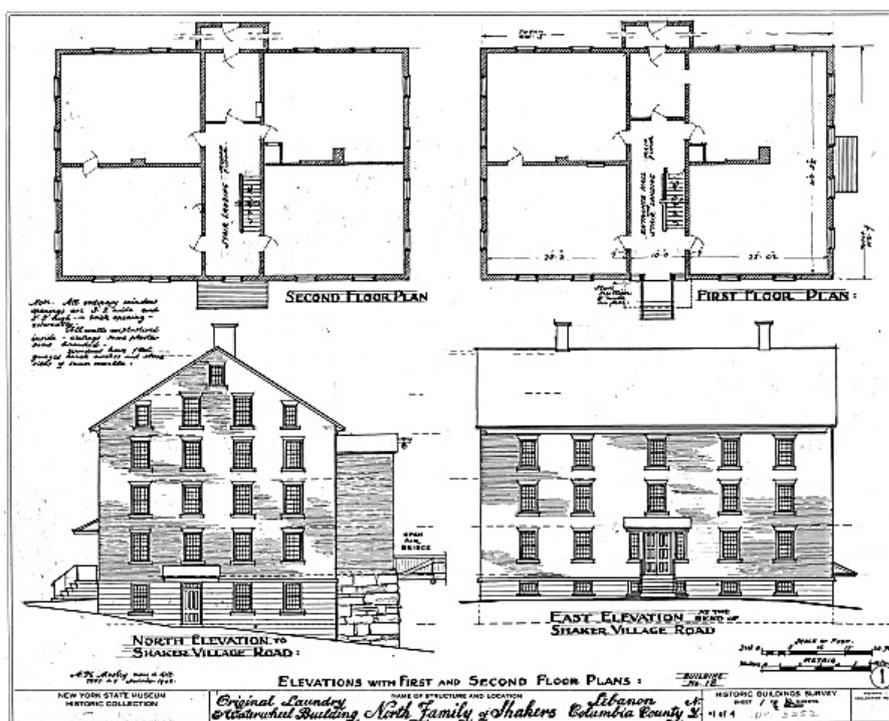


Рис. 10. Чертеж дома шейкеров, XVII в.<sup>11</sup>  
 Fig. 10. Drawing of the Shaker house, 17th century

Мировой опыт функционирования доступного жилища отличается большим разнообразием типов жилых домов, виды которых продолжают существенно расширяться в настоящее время. Архитектура доступного жилища

<sup>11</sup> URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Architecture-of-Control%3A-Shaker-Dwelling-Houses-Nicoletta/a53d849bc5005e322c50fb34cc458f65f306ec56>

отражает меняющиеся потребности людей, ценности и тенденции в жилищной политике конкретной страны в определенный период развития.

Таким образом, на основании анализа опыта организации экономически доступного жилья рассматриваемых стран определены типы объектов жилища по следующим параметрам: период и срок проживания, тип владельцев, категория проживающих, вид деятельности (таблица).

#### Опыт экономически доступного жилища стран России, Европы, Америки Affordable housing in Russia, Europe, and USA

Название, время возникновения	Статус жилища (временное/постоянное)	Тип владельца	Категория населения	Вид деятельности
Бурса (bursae) V–XV вв.	Временного проживания	Государство	Студенты, преподаватели	Некоммерческая
Богадельня (Almshouse) X в.	Постоянного проживания	Государство	Бездомные	Некоммерческая
Фуггерай (Fuggerei Fuckerei) XVI (1514–1523)	Постоянного проживания	Частное лицо	Ремесленники	Некоммерческая
Поселения шейкеров (Shaker Dwelling Houses XVII–XVIII вв.)	Постоянного проживания	Частное лицо	Ремесленники	Некоммерческая

#### Выводы

В результате проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Религиозно-идеологические мировоззрение стало одним из факторов возникновения экономически доступного жилища. Созданные в разные исторические периоды бурсы, богадельни и др. играли важную роль в обеспечении жильем бедных и нуждающихся. Бурсы представляли собой не только места обучения, но и социальные центры, где студенты могли жить и общаться в интеллектуальной среде. Богадельни, в свою очередь, обеспечивали поддержку и защиту для бедных и нуждающихся, заботясь о наиболее уязвимых членах общества. Комплекс Фуггерай в Аугсбурге стал примером инновационного подхода к формированию жилища для бедных, предоставляя им доступное и комфортное жилье. Деревни шейкеров в Америке демонстрировали уникальное сочетание религиозных идеалов с простотой и функциональностью архитектуры, создавая гармоничное пространство для общественного и духовного развития. Эти общественные жилищные комплексы отражали социальные, религиозные и культурные идеалы своего времени, а их архитектурные особенности являются наследием и вносят вклад в понимание социальной истории и развития жилищного строительства.

2. Выявлено, что доступные жилища периода V–XVIII вв. строились по инициативе частных лиц.

3. Определены типы объектов жилища по периоду и сроку проживания, типу владельцев, категории проживающих, виду деятельности.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Кияненко К.В.* Современное рыночное жилище: архитектурная типология, социология, экономика и менеджмент : краткий англо-русский терминологический словарь-справочник. Вологда : ВоГТУ, 1999. 93 с.
2. *Grassl A., Heath G.* The magic triangle: a short history of the world youth hostel movement. International Youth Hostel Federation, 1982. 192 p.
3. *Edwards G.A.* Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree Master of science. Department of Hospitality Management and Dietetics. College of Human Ecology. Kansas State University. Kansas, Manhattan, 2012. 86 p. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/10652937.pdf> (дата обращения: 22.03.24).
4. *French M.* The history of social housing: an ongoing story // New York City Cemetery Project. 2020. P. 9–48. URL: <https://nycemetery.wordpress.com/2019/05/07/almshouse-burial-grounds/> (дата обращения: 22.03.24).
5. *Giovanazzi T.* Poverty and Architecture The Fuggerei as an Early Example of Affordable Housing // Burning Farm. 2023. 10 October. P. 1–16. URL: [https://www.burning.farm/downloads/Burning%20Farm\\_Poverty%20and%20Architecture%20The%20Fuggerei%20as%20an%20Early%20Example%20of%20Affordable%20Housing\\_Theodora%20Giovanazzi.pdf](https://www.burning.farm/downloads/Burning%20Farm_Poverty%20and%20Architecture%20The%20Fuggerei%20as%20an%20Early%20Example%20of%20Affordable%20Housing_Theodora%20Giovanazzi.pdf)
6. *Tweed courthouse archeological survey* and data retrieval investigations. V. 1. New York : Hartgen archeological associates. 2003. URL: [https://s-media.nyc.gov/agencies/lpc/arch-reports/365\\_A.pdf](https://s-media.nyc.gov/agencies/lpc/arch-reports/365_A.pdf) (дата обращения: 22.02.24).
7. *Bankoff H.A., Loorya A.* The history and archaeology of City Hall Park. 2008. URL: [https://s-media.nyc.gov/agencies/lpc/arch-reports/1046\\_A.pdf](https://s-media.nyc.gov/agencies/lpc/arch-reports/1046_A.pdf) (дата обращения: 22.02.24).
8. *Nicoletta J.* The architecture of control: Shaker dwelling houses and the reform movement in early-nineteenth-century America // Journal of the Society of Architectural Historians. 2003. V. 62 (3). P. 352–387. DOI 10.2307/3592519. URL: [https://digitalcommons.tacoma.uw.edu/ias\\_pub/22](https://digitalcommons.tacoma.uw.edu/ias_pub/22) (дата обращения: 22.02.24).
9. *Zerega D. Wall, Cantwell A.-M.* Touring Gotham’s archaeological past. 2004. 226 p.
10. *Marilyn Anderson.* Under city hall park // Archaeology. 2000. URL: <https://archive.archaeology.org/online/features/cityhall/> (дата обращения: 22.02.24).
11. *Nicoletta J., Mogan B.* The architecture of the Shakers. Vermont : Countryman Press, 2000. 179 p.
12. *Aouf R.-S.* Shaker style is back again as designers celebrate «the first minimalists» // Dezeen. 2018. 22 January. URL: <https://www.dezeen.com/2017/03/01/shaker-style-back-designers-celebrate-first-minimalists-design-furniture-homeware/> (дата обращения: 22.02.24).
13. *Hogan M.* The Shakers. The University of Virginia, 2017. URL: <http://xroads.virginia.edu/~hyper/hns/cities/shakers.html> (дата обращения: 22.12.23).

#### REFERENCES

1. *Kiyanenko K.V.* Modern market housing: Architectural typology, sociology, economics and management: A brief English-Russian terminological dictionary-reference book. Vologda, 1999. (In Russian)
2. *Grassl A., Heath G.* The magic triangle: A short history of the world youth hostel movement. International Youth Hostel Federation, 1982. 192 p.
3. *Edwards G.A.* Department of Hospitality Management and Dietetics. College of Human Ecology. Master’s Degree Thesis. Kansas State University. Kansas, Manhattan, 2012. 86 p. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/10652937.pdf>
4. *French M.* The history of social housing: An ongoing story. New York City Cemetery Project. 2020. Pp. 9–48. Available: <https://nycemetery.wordpress.com/2019/05/07/almshouse-burial-grounds/>
5. *Giovanazzi T.* Poverty and architecture. Fuggerei as an early example of affordable housing. Burning Farm. 2023. Pp. 1–16. Available: [www.burning.farm/downloads/Burning%20Farm\\_](http://www.burning.farm/downloads/Burning%20Farm_)

- Poverty%20and%20Architecture%20The%20Fuggerei%20as%20an%20Early%20Example%20of%20Affordable%20Housing\_Theodora%20Giovanazzi.pdf
6. Tweed courthouse archeological survey and data retrieval investigations. Vol. 1. New York. 2003. Available: [https://s-media.nyc.gov/agencies/lpc/arch\\_reports/365\\_A.pdf](https://s-media.nyc.gov/agencies/lpc/arch_reports/365_A.pdf)
  7. *Bankoff H.A., Loorya A.* The history and archaeology of City Hall Park. 2008. Available: [https://s-media.nyc.gov/agencies/lpc/arch\\_reports/1046\\_A.pdf](https://s-media.nyc.gov/agencies/lpc/arch_reports/1046_A.pdf)
  8. *Nicoletta J.* The architecture of control: Shaker dwelling houses and the reform movement in early-nineteenth-century America. *Journal of the Society of Architectural Historians*. 2003; 62 (3): 352–387. DOI: 10.2307/3592519. Available: [https://digitalcommons.tacoma.uw.edu/ias\\_pub/22](https://digitalcommons.tacoma.uw.edu/ias_pub/22)
  9. *Zerega D. Wall, Cantwell A.-M.* Touring Gotham's archaeological past. 2004. 226 p.
  10. *Marilyn Anderson.* Under City Hall Park. *Archaeology*. 2000. Available: <https://archive.archaeology.org/online/features/cityhall/>
  11. *Nicoletta J., Mogan B.* The architecture of the Shakers. Vermont: Countryman Press, 2000. 179 p.
  12. *Aouf Rima Sabina.* Shaker style is back again as designers celebrate "the first minimalists". Available: [www.dezeen.com/2017/03/01/shaker-style-back-designers-celebrate-first-minimalists-design-furniture-homeware/](http://www.dezeen.com/2017/03/01/shaker-style-back-designers-celebrate-first-minimalists-design-furniture-homeware/)
  13. *Hogan M.* The Shakers. The University of Virginia, 2017. Available: <http://xroads.virginia.edu/~hyper/hns/cities/shakers.html>

#### Сведения об авторе

Огиенко Евгений Леонидович, ассистент, Российский университет дружбы народов, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, [tengue@list.ru](mailto:tengue@list.ru)

#### Author Details

*Evgeniy L. Ogienko*, Assistant Lecturer, Peoples' Friendship University of Russia, 6, Miklukho-Maklaya Str., 117198, Moscow, Russia, e-mail: [tengue@list.ru](mailto:tengue@list.ru)

Статья поступила в редакцию 26.02.2024  
Одобрена после рецензирования 14.03.2024  
Принята к публикации 15.03.2024

Submitted for publication 26.02.2024  
Approved after review 14.03.2024  
Accepted for publication 15.03.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 2. С. 61–68.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (2): 61–68.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.01

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-61-68

EDN: CKTKRM

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОЛОРИСТИКИ КЛАССИЦИЗМА В САРАТОВЕ

Татьяна Валерьевна Негуляева, Елена Сергеевна Дудина,  
Мария Дмитриевна Майскова

*Саратовский государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия*

**Аннотация.** Классицизм Саратова, как первый этап каменного строительства города, сыграл главенствующую роль при формировании архитектурной среды исторического центра на всех его уровнях, включая семантические характеристики, проявляющиеся в колористическом решении.

В статье рассмотрены процессы организации и самоорганизации цветового решения застройки, созданной в Саратове в период классицизма.

**Цель исследования** – выявить региональные особенности колористики классицистической застройки г. Саратова.

**Научная новизна** состоит в изучении цветовых гармоний, заложенных в архитектурную среду исторического центра города.

Основными уровнями научного познания приняты: теоретический метод, предполагающий изучение текстовых материалов, описывающих архитектуру классицизма, и практический – с определением колористических характеристик элементов среды и их гармоничных сочетаний, а также системный анализ материала.

**В результате исследования** выявлены особенности региональной колористики исторического центра Саратова, основанные на цветовых характеристиках, заложенных в период классицизма.

**Ключевые слова:** классицизм, колористика, природная цветность региона, городская среда

**Для цитирования:** Негуляева Т.В., Дудина Е.С., Майскова М.Д. Региональные особенности колористики классицизма в Саратове // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 61–68. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-61-68. EDN: CKTKRM

## ORIGINAL ARTICLE

## CLASSICISM IN THE SARATOV REGION

Tat'yana V. Negulyeva, Elena S. Dudina, Mariya D. Maiskova  
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

**Abstract.** Saratov's classicism is the first stage of its capital construction. It plays a major role in the formation of the architectural environment of the historical center. Classicism also influences the formation of the central part of the city. The article considers the processes of organization and self-organization of buildings in Saratov during the period of Classicism.

**Purpose:** Identification of classicism buildings in Saratov.

**Methodology/approach:** The main levels of scientific knowledge are accepted: a theoretical method involving the study of documents describing the architecture of classicism, a practical method to determine the elements of the environment, their harmony, and the systems analysis of these documents.

**Research findings:** Regional properties of Saratov are studied for the period of classicism.

**Value:** A study of harmony in the architectural environment of the historical center Saratov.

**Keywords:** classicism, Saratov, urban environment

**For citation:** Negulyaeva T.V., Dudina E.S., Maiskova M.D. Classicism in the Saratov region. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 61–68. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-61-68. EDN: CKTKRM

## Введение

Конец XVIII – первая половина XIX в. – это, по сути, начальный этап формирования капитальной застройки г. Саратова. Как и во многих других российских городах, в те времена в Саратове по главным центральным улицам начали возводиться классицистические «образцовые» дома, заменяющие хаотичную, «самостройную» деревянную архитектуру. Благодаря выстроенным в ряд окрашенным каменным фасадам город приобрел ухоженный, парадный и монументальный вид. Свежесть сочетания белых колонн на фоне светлых желтых и охристых оттенков новых зданий, на контрасте с голубизной отражающегося в Волге неба, создала чрезвычайно убедительный колористический образ г. Саратова эпохи классицизма. Образ был настолько сильным и точным, что он во многом предопределил формирование колористики города на все последующее времена, вплоть до настоящего момента. Классицистическая палитра Саратова стала основой для формирования колористической идентичности города.

**Классицистическая палитра Саратова как основа для формирования колористической идентичности исторического центра**

Как известно, в начале XIX в. устройство городов, в том числе и окраска зданий, были регламентированы указами, утвержденными императором. Они запрещали «пестрить дома краскою» [Цит. по: 1], и в строительную практику были введены списки цветов, разрешенных для окрашивания фасадов (рис. 1). В п. 46 Указа 1817 г. предписывалось следующее: «Вообще позволять красить дома нижеследующими только цветами: белым, палевым, бледно-желтым,

светло-серым, диким, бледно-розовым, сибиркою, но с большею примесью белой краски, и желто-серым» [Цит. по: 1]. Министерство полиции доставляло в губернии дощечки с выкрасками цветов: «сими красками выкрашенные, для показания настоящих цветов» [Цит. по: 1].

Перечень цветов для окрашивания «образцовых фасадов» периода классицизма Оттени из журнала комиссии для строителей, 1818 год	Белый		Оттени из указа № 27180, 1817 год	Белый		Колористика «образцовых фасадов», используемых в г. Саратове Оттени из указа № 27180, 1817 год	Белый	
	Светло-серый			Светло-серый			Светло-серый	
	Дикий			Дикий			Дикий	
	Палевый			Палевый			Палевый	
	Светло-желтый			Бледно-желтый			Бледно-желтый	
	Бланжевый			Бледно-розовый			Бледно-розовый	
	С прозеленью			Сибирка, с большею примесью белой краски			Сибирка, с большею примесью белой краски	
	Бледно-зеленый			Желто-серый			Желто-серый	

Рис. 1. Перечень цветов для окрашивания «образцовых фасадов» периода классицизма  
Fig. 1. List of colors for painting facades of the Classicism period

Рекомендованные для окрашивания пигменты были, как правило, местного происхождения. Они издревле добывались в России и по своим свойствам хорошо подходили для наружных работ. В чистом виде использовалась только охра, остальные краски были составными и смешивались в определенных пропорциях для получения различных «теней» – оттенков. Предложенные цвета часто изготавливались на основе белил и относились к нежной пастельной гамме. В самоучителе Ж.Ф. Ватен объясняет, что необходимость в смешивании красителей основана не только на понимании красоты нежных, светлых тонов, но и служит для уплотнения красок, повышения их укрывных свойств: «...исключая некоторые охры <...> неудобно употреблять вещества, дающие краски, по причине их легкости или тонкости: не имея корпусности, они могут смешиваемы быть с белилами свинцовыми и меловыми, чтобы покрывали какое-нибудь место» [2].

В 1818 г. ограничения ввелись в колористку крыш. Теперь их можно было красить только в дозволенные цвета: дикий, зеленый и красный. Указ 1818 г.<sup>1</sup> также повлиял на гармонизацию и упорядочение колористических характеристик городов.

В отличие от столичных городов, в Саратове, как и в других губерниях, чаще всего для окрашивания зданий использовали охристые пигменты, что прежде всего связано с их низкой стоимостью, простотой изготовления красителя, высокой плотностью и укрывной способностью. На рис. 1 указаны перечни цветов, разрешенные для окрашивания «образцовых» фасадов периода классицизма<sup>2</sup>, и те из них, которые нашли применение в Саратове. Розовые,

<sup>1</sup> Полное собрание законов Российской Империи. Собрание 1: с 1649 по 12 декабря 1825 года. Санкт-Петербург, 1830. Т. 34 (1817).

<sup>2</sup> Полное собрание законов Российской Империи. Собрание второе. Т. XIX. Отделение первое. От № 17472–18572. Санкт-Петербург: Типография II отделения собственной Е.И.В. Канцеля-

сиреневые, «сибирка» и серые оттенки (кроме цоколей зданий) не нашли широкого применения.

В историческом ядре уникальным представителем нарышкинского барокко является сохранившийся красно-белый Свято-Троицкий кафедральный собор. Площадь вокруг него сформирована в период классицизма и выполнена преимущественно в охристых тонах. От исторического ядра по направлениям близлежащих улиц (Московская, Чернышевского (Царицынская), Лермонтова (Воздвиженская), Челюскинцев (Троицкая), Мичурина (Понкратовская), Соляная (Архангельская) и др.) распространяется солнечная светложелтая и охристая гамма. Застройка на этих улицах сформирована каменными домами, относящимися либо к классицистической, либо к переходной в эклектику стилистике. В существующей застройке г. Саратова сохранилось 47 зданий, выстроенных в период к. XVIII – первой половины XIX в., которые пунктиром проходят по главным улицам города, создают колористический каркас и существенно влияют на восприятие исторического центра (рис. 2).

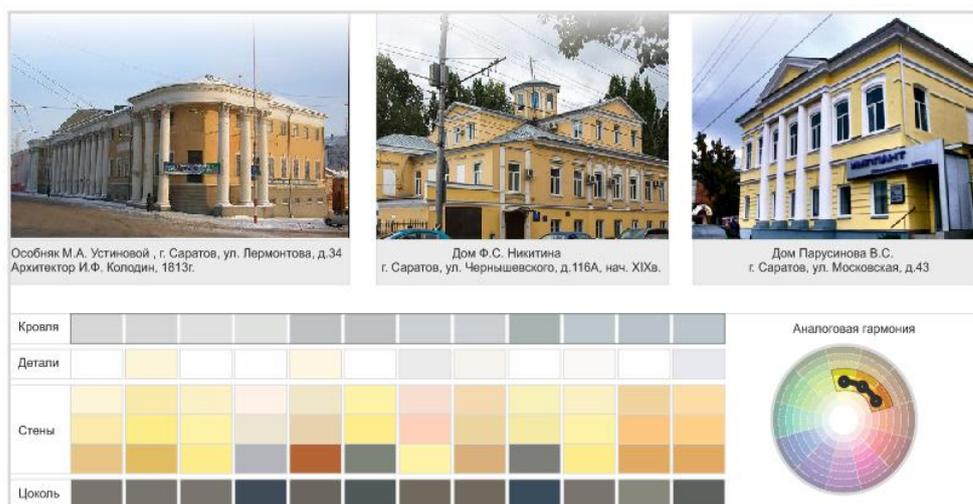


Рис. 2. Колористика классицистической застройки г. Саратова<sup>3</sup>. Матрица цвета и аналоговая гармония выполнены на основе ПСЗРИ 1845 и 1857 гг.

Fig. 2. Classicism buildings in Saratov. The color matrix and analog harmony

Стоит отметить, что памятники архитектуры не воспринимаются отдельно от окружающей среды. Важнейшим фактором, определяющим особенности их восприятия, является природная колористика региона [3]. Для Саратова это прежде всего полноводная река Волга. Широкая спокойная речная гладь, отра-

рии, 1845; Полное собрание законов Российской Империи. Собрание второе. Т. XXXI. Отделение первое. От № 30013–31348. Санкт-Петербург: Типография II отделения собственной Е.И.В. Канцелярии, 1857; Урочное положение для строительных работ. Высочайше утверждено 17 апреля 1869 года. Санкт-Петербург: Типография правительствующего сената, 1887. 354 с.

<sup>3</sup> URL: <https://theslide.ru/geografiya/ekskursiya-po-gorodu-saratovu-9-klass>; [https://www.tursar.ru/image/img841\\_0.jpg](https://www.tursar.ru/image/img841_0.jpg); [https://www.tursar.ru/image/img1980\\_0.jpg](https://www.tursar.ru/image/img1980_0.jpg);

жая небо, обильно насыщает среду светло-синими и голубыми оттенками. Холмы, поросшие смешанными лесами, включают в колористику серо-зеленые и древесные оттенки. Умеренно континентальный климат также играет немаловажную роль. Световой климат региона характеризуется высокой интенсивностью освещения с преобладанием солнечных дней в летний период и диффузным освещением с преобладанием пасмурных дней в зимний. Контрастные проявления времен года с жарким солнечным летом, холодной белоснежной зимой и продолжительными межсезоньями существенно обогащают природную колористику (рис. 3). Палитра Саратовского классицизма гармонично вписалась в цветность региона. Летом охристая застройка растворяется в обилии солнечных лучей, встраиваясь в природные контрастные отношения солнца и воды. Холодной зимой колористика городской застройки привносит ощущение тепла, добавляет цвета в сезонную ахроматику.



Рис. 3. Палитра застройки классицизма Саратова и региональная природная цветность<sup>4</sup>

Fig. 3. The palette of Saratov's classicism buildings and natural regional coloration

Влияние мягкой классицистической гаммы на архитектурную палитру города проявляется и за пределами исторического ядра. Это хорошо видно на примере колористики ул. Московской, которая проходит через всю центральную часть города и демонстрирует развитие и смену стилистических направлений в архитектуре и их колористические особенности. Ближе к периферии исторического центра часто встречаются краснокирпичные здания, относящиеся к эклектике. Они были многократно перекрашены в процессе эксплуатации и приобрели более светлые приглушенные оттенки, поскольку красный кирпич воспринимался слишком темным, «выпадал» и нарушал целостность фронта застройки объектов классицизма.

Здания модерна в Саратове отличаются скромностью и сдержанностью как в композиции, так и в колористике. Фасады нередко окрашены в серые, серо-желтые и серо-зеленые, серо-розовые и сиреневые оттенки. Этих зданий относительно немного, и в целом их цветность остается в теплой части спектра (рис. 4). Неоклассицизм сохранил приверженность классицистическим тенденциям в колористике городской среды. Застройка конструктивизма и советского модернизма в основном ахроматична. Современная застройка корректно вписана в историческую среду и выполнена в сдержанной, нейтральной гамме.

<sup>4</sup> URL: <http://parnasse.ru/images/photos/medium/article12795.jpg>

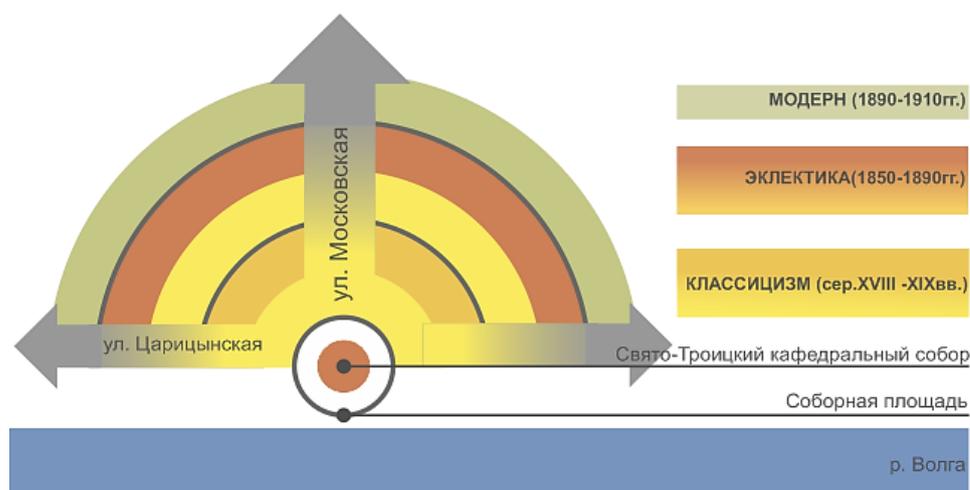


Рис. 4. Влияние классицистической палитры на колористику центральной части  
 Fig. 4. Influence of the classicist palette on the Saratov's center

### Самоорганизация колористических характеристик исторического центра

Гармоничная и сдержанная колористика исторического центра Саратова, сложившаяся под влиянием мощного пласта классицистического наследия, не раз претерпевала изменения в советский период. Знаменуя символические даты и важные события в истории страны, центр города часто «освежался». Процесс смены цветов соответствовал взглядам эпохи. В колористике центральной части появлялись новые оттенки: розовый, зеленый, сиреневый и др. Но, несмотря на эти преобразования, к началу XXI в. исторический центр вновь вернулся к исторической охристой гамме, что доказывает ее состоятельность и устойчивость. Подробно процесс самоорганизации цветовых характеристик можно рассмотреть на примере городской усадьбы Осипа Карзанова (ул. Октябрьская, 45), возведенной в к. XVIII в. по «образцовому проекту».

На фрагменте фасада (рис. 5) обнаружено отслоение слоев краски, отражающее процесс изменения колористики здания.



Рис. 5. Процесс самоорганизации колористики исторического центра на примере усадьбы Осипа Карзанова

Fig. 5. Self-organization of the historical center's colorism of Osip Karzanov's estate

Изначально усадьба была окрашена в палевый цвет (по журналу Комиссии 1817 г.). Следующий слой краски – светлый оттенок зеленого (интерпретация бледно-зеленого цвета из журнала Комиссии 1816 г.). При выполнении ремонта фасадов в первой половине XX в. объекты классицизма часто перекрашивали в цвета, которые были характерны для периода их постройки. Во второй половине XX в. наметилась тенденция возврата целостности исторической среде. Здание было перекрашено в краснокирпичный цвет. Это связано с обилием эклектичной застройки по ул. Челюскинцев, на пересечении с которой расположена усадьба. Благодаря позиции Комитета по охране культурного наследия в современный период памятникам архитектуры возвращается исторический облик. Более 15 лет назад облик здания стал близок к изначальному цвету. Можно привести ряд примеров последних лет, когда применение избыточно интенсивных или чужеродных стилистике зданий красителей вызывало отрицательную реакцию не только органов сохранения культурного наследия, но и общественности, горожан. Тогда здание приводилось в соответствие с колористическими требованиями.

### Заключение

Классицистическая палитра Саратова является основой для формирования цветовой идентичности исторического центра.

В период классицизма в Саратове, как и в других губерниях, чаще всего для окрашивания зданий использовали охристые пигменты, что связано с их низкой стоимостью и простотой изготовления красителей.

Палитра саратовского классицизма гармонично взаимодействовала с природной цветностью региона. Летом охристая застройка растворяется в обилии солнечных лучей, вписываясь в природный контраст солнца и воды. Холодной зимой городская среда добавляет тепла и цвета, а в межсезонье смягчает пасмурные тона.

Классицистическая палитра Саратова явилась основой для формирования колористической идентичности исторического центра. Влияние мягкой классицистической гаммы на архитектуру проявляется и за пределами исторического ядра. Здания эклектики перекрашены в более приглушенные оттенки. Модерн сдержан в композиции и цвете, неоклассицизм сохранил классицистические тенденции. Современная застройка корректна и спокойна по цвету.

Гармоничная и сдержанная колористика исторического центра Саратова, сложившаяся под влиянием мощного пласта классицистического наследия, не раз претерпевала изменения в советский период. Но, несмотря на эти преобразования, к началу XXI в. исторический центр вновь вернулся к исторической охристой гамме, что доказывает ее состоятельность и устойчивость.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Грибер Ю.А. Указы, регулирующие колористику городов Российской империи // Урбанистика. 2016. № 4. С. 57–72.
2. Ватен Ж.Ф. Самоучитель трех искусств: живописи декорационной, золочения и лакирования: с приложением двух новейших изобретений. Москва : Университетская типография, 1824. 308 с.
3. Ефимов А.В. Колористика города. Москва : Стройиздат, 1990. 272 с.

4. *Иттен И.* Искусство цвета. Москва : Издатель Д. Аронов, 2004. 53 с.
5. *Агранович-Пonomарева Е.С., Литвинова А.А.* Архитектурная колористика. Минск : Технопринт, 2002. 122 с.

## REFERENCES

1. *Gribber Yu.A.* Decrees regulating the coloristics of the Russian Empire cities. *Urbanistika*. 2016; (4): 57–72. (In Russian)
2. *Vaten Zh.F.* Self-tutorial of three arts: Decorative painting, gilding and varnishing with an appendix of two of the latest inventions. Moscow: Universitetskaya tipografiya, 1824. 308 p. (In Russian)
3. *Yefimov A.V.* Coloristics. Moscow: Stroizdat, 1990. 272 p. (In Russian)
4. *Itten I.* The art of color. Moscow: D. Aronov, 2004. 53 p. (In Russian)
5. *Agranovich-Ponomareva E.S., Litvinova A.A.* Architectural coloristics. Minsk: Technoprint, 2002. 122 p. (In Russian)

## Сведения об авторах

*Негуляева Татьяна Валерьевна*, аспирант, доцент, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, negtan@mail.ru

*Дудина Елена Сергеевна*, аспирант, доцент, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, slivovca@ya.ru

*Майскова Мария Дмитриевна*, ассистент, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, gmd.94@mail.ru

## Authors Details

*Tat'yana V. Negulyeva*, Research Assistant, A/Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia, negtan@mail.ru

*Elena S. Dudina*, Research Assistant, A/Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia, slivovca@ya.ru

*Mariya D. Maiskova*, Assiatnt Lecturer, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia, gmd.94@mail.ru

## Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Authors contributions

The authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 02.05.2023  
Одобрена после рецензирования 29.06.2023  
Принята к публикации 19.03.2024

Submitted for publication 02.05.2023  
Approved after review 29.06.2023  
Accepted for publication 19.03.2024

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

## BUILDING AND CONSTRUCTION

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 2. С. 69–79.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (2): 69–79.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 69.032.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-69-79

EDN: CLOKPS

### О РАЗВИТИИ РАСЧЁТОВ КОНСТРУКЦИЙ, УСИЛИВАЕМЫХ МЕТОДОМ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

**Александр Александрович Коянкин**

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия*

**Аннотация.** *Актуальность.* Расчёты в программных комплексах, в основе которых заложен метод конечных элементов, выполняемые с учётом генетической нелинейности, т. е. с учётом процесса монтажа, для ряда строительных задач являются невыполнимыми. В частности, в зданиях и сооружениях из сборно-монолитного железобетона происходит поэтапное вовлечение в процесс деформирования и восприятия внешней нагрузки сборного и монолитного бетонов. В реконструируемых зданиях и сооружениях в процессе наращивания сечения элемента (например, устройство железобетонной «фру-башки» или металлической «обоймы») также в разное время включаются в процесс деформирования и восприятия внешней нагрузки материал усиления и усиливаемая часть элемента. В итоге в «старой» части элемента к моменту устройства и набора необходимой прочности «новой» частью присутствуют начальные напряжения и деформации. В то же время в материале усиления или монолитной части сборно-монолитного элемента напряжённо-деформированное состояние является нулевым до приложения дополнительной нагрузки.

Таким образом, при выполнении расчётов требуется изменение жёсткости конечного элемента, однако в программных комплексах, в основе которых заложен метод конечных элементов, отсутствует конечный элемент, способный менять (увеличивать) жёсткость. Обозначенное выше определяет актуальность разработки алгоритма расчёта реконструируемых и сборно-монолитных зданий и сооружений в программных комплексах с использованием метода параллельного элемента.

**Цель** настоящей работы – усовершенствование метода параллельного элемента и разработка на его основе алгоритма расчёта, позволяющего выполнять расчёт в программных комплексах, в основе которых заложен метод конечных элементов.

**Результаты.** На основании уточнённого метода параллельного элемента предложен алгоритм выполнения расчёта реконструируемых и сборно-монолитных зданий и со-

оружений в программных комплексах, в основе которых заложен метод конечных элементов. Алгоритм позволяет учесть конструктивные особенности реконструируемых и сборно-монолитных зданий и сооружений, включая поэтапное вовлечение в процесс деформирования разновозрастных материалов. С использованием предложенного алгоритма выполнен пример расчёта реконструируемой системы, в рамках которой осуществляется замена конечного элемента. При этом происходит одновременная смена шарнирного сопряжения элементов на жёсткое.

**Ключевые слова:** сборно-монолитные конструкции, усиление конструкций, генетическая нелинейность, поэтапность монтажа, поэтапность приложения нагрузки, метод параллельного элемента, метод конечных элементов

**Для цитирования:** Коянкин А.А. О развитии расчётов конструкций, усилимых методом параллельного элемента // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 69–79. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-69-79. EDN: CLOKPS

## ORIGINAL ARTICLE

### PARALLEL FEM FOR STRUCTURAL ANALYSIS OF REINFORCED SYSTEMS

**Aleksandr A. Koyankin**

*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

**Abstract.** Calculations in software systems based on the finite element method (FEM), performed with account for genetic nonlinearity, i.e., assembling, are not feasible for a number of construction problems. In particular, in buildings made of factory-made and cast-in-place concrete, the latter is gradually involved in deformation and external load processes. In reconstructed buildings, during the increase in the element cross-section (e.g., reinforced concrete or metal casing), the reinforcing and reinforced materials are also involved in deformation and external load processes at different time. As a result, there are initial stresses and strains in the "old" part of the element by the time its "new" part installation and strength gain. At the same time, in the reinforcing material or cast-in-place element, the stress-strain state is zero until the additional load is applied.

Thus, during the structural analysis, a change in the finite element stiffness is required. But FEM software systems have no finite element capable of changing (increasing) the stiffness. This determines the relevance of the developed algorithm for the structural analysis of factory-made and cast-in-place concrete buildings using the parallel FEM.

**Purpose:** The aim of this work is to improve the parallel FEM and develop a calculation algorithm based on it.

**Research findings:** Based on the parallel FEM, the calculation algorithm is proposed for factory-made and cast-in-place concrete buildings. The proposed algorithm accounts for the structural properties of such buildings, including the gradual involvement of different-aged materials in the deformation process. Using the proposed algorithm, the structural analysis is conducted for the reconstructed system, in which the finite element is replaced by the parallel element, and the hinge coupling of elements is simultaneously replaced by a rigid one.

**Keywords:** cast-in-place concrete structure, genetic nonlinearity, stage-by-stage installation, stage-by-stage load application, parallel FEM

**For citation:** Koyankin A.A. Parallel FEM for structural analysis of reinforced systems. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 69–79. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-69-79. EDN: CLOKPS

## Введение

Программные комплексы (ПК), основанные на методе конечных элементов (МКЭ), находятся в постоянном развитии (как обновляются до более совершенных версий существующие ПК, так и предлагаются новые) [1, 2]. Данный процесс совершенно естественен, т. к. выполнение расчётов в ПК позволяет не только сократить время разработки проектной документации, но и даёт возможность проектировщику увидеть пространственную схему деформирования здания в целом с учётом практически всех конструктивных особенностей. Кроме того, при расчёте каркаса здания в ПК важна возможность учёта генетической нелинейности (этапов монтажа и приложения нагрузки) [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. В итоге конструктивная надёжность зданий и сооружений становится выше.

Однако в теории строительных конструкций зданий и сооружений имеются строительные задачи, решение которых невыполнимо только лишь за счёт технических возможностей существующих ПК, основанных на МКЭ. Одной из таких задач является изменение жёсткости (увеличение/уменьшение) элемента в процессе его монтажа или эксплуатации. Например, в зданиях и сооружениях из сборно-монолитного железобетона происходит поэтапное включение в процесс деформирования и восприятия внешней нагрузки сборного и монолитного бетонов, т. е. сборный элемент «превращается» в сборно-монолитный большей жёсткости [4, 5, 7, 11]. До того, как монолитный бетон наберёт требуемую прочность, в сборной части формируются начальные напряжения и деформации от нагрузок собственного веса и веса монолитного бетона. В процессе усиления строительных конструкций происходит изменение жёсткости усиливаемого элемента в результате наращивания сечения (устройство железобетонной «рубашки» или металлической «обоймы»). Однако в усиливаемой конструкции присутствуют начальные напряжения и деформации, сформированные в ходе её эксплуатации, в то время как в материале усиления напряжёнno-деформированное состояние (НДС) нулевое до момента приложения дополнительной нагрузки [7, 13, 14, 15]. Обратным случаем является деградация элемента в процессе его эксплуатации, когда происходит уменьшение сечения элемента (потеря площади сечения в ходе воздействия агрессивной среды или аварийных ситуаций). Здесь необходимо учесть перераспределение усилий, происходящее между элементами конструкции каркаса.

## Методы

В работе [8] обозначенные выше случаи разделены следующим образом:

– элемент приобрёл новую жесткостную характеристику, но при этом НДС системы не изменилось, а новая характеристика жёсткости проявляется лишь после изменения нагрузки;

– элемент поменял свою жесткостную характеристику, оставаясь нагруженным, т. е. то внутреннее усилие, которое в нём было до модификации, передаётся обновлённому элементу, и происходит перераспределение усилий в системе без изменения нагрузки.

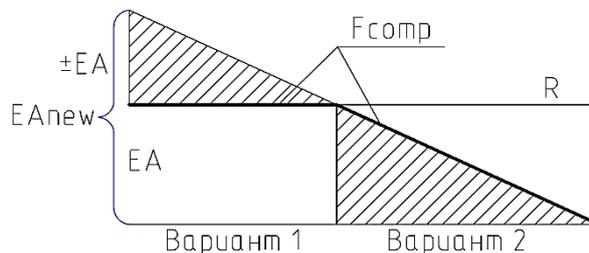
Первый случай относится к вопросам усиления строительной конструкции или к сборно-монолитным конструкциям, где в результате наращивания сечения происходит увеличение жёсткости конструкции.

Второй случай относится к вопросам деградации (ослабления) сечения строительной конструкции, где происходит уменьшение жёсткости конструкции.

В работе [8] приведен расчёт второго случая на примере шарнирно-стержневой системы, представленной в работе [9]. В качестве инструмента расчёта рассмотрен метод параллельного элемента (МПЭ) [9], где автор предлагает применить МПЭ для случая деградации элемента, расположенного в шарнирно-стержневой системе. При этом речь идёт только об уменьшении продольной жёсткости элемента (изгибная жёсткость, равно как и изгибающие моменты и поперечные силы, в системе не рассматриваются), а снижение жёсткости восполняется введением компенсирующих усилий.

Отличительной особенностью первого случая является то, что ослабление сечения сопровождается уменьшением усилий в элементе и одновременным перераспределением усилий в конструктивной системе в целом. Во втором случае изменение жёсткости не приводит к изменению усилий ни в самом элементе усиления, ни в конструктивной системе, поэтому удаление «старого» стержня меньшей жёсткостью и введение «нового» стержня большей жёсткостью не должно приводить к изменению НДС системы. Неизменение НДС системы при замене стержня возможно достичь в результате введения компенсирующих усилий, соответствующих реакции отбрасываемого элемента.

Увеличение жёсткости элемента потребует компенсирующих усилий, равных реакциям «старого» элемента. Снижение жёсткости элемента требует введения компенсирующих усилий величиной пропорционально теряемой жёсткости старого элемента (рис. 1).



EA – «старый» элемент  
 EAnew – «новый» элемент  
 ±EA – приращение жёсткости «старого» элемента  
 R – реакция «старого» элемента на 1-м этапе  
 Fcomp – компенсирующее усилие

Рис. 1. Соотношение жёсткостей «нового» и «старого» элементов  
 Fig. 1. Stiffness ratio between "new" and "old" elements

Алгоритм выполнения расчёта в ПК, основанном на МКЭ, с использованием МПЭ:

1. Формирование расчётной схемы  $i$ -го этапа со следующими параметрами:  $K_i$  – матрица жёсткости системы на  $i$ -м этапе;  $\Delta F_i$  – вектор-столбец дополнительных приведённых узловых нагрузок системы на  $i$ -м этапе.

2. На основании уравнения

$$K_i \cdot \Delta U_i = \Delta F_i \quad (1)$$

определяются дополнительные перемещения узлов системы на  $i$ -м этапе ( $\Delta U_i$  – вектор-столбец дополнительных перемещений узлов системы на  $i$ -м этапе).

3. На основании  $\Delta U_i$  определяются  $\Delta R_i$  – приращения реакций в узлах системы на  $i$ -м этапе с последующим определением  $\Delta N_i$ ,  $\Delta Q_i$  и  $\Delta M_i$  – приращения продольной и поперечной сил, изгибающих моментов в элементах системы на  $i$ -м этапе соответственно.

4. Полные реакции в узлах и усилия в элементах системы на  $i$ -м этапе определяются путём суммирования реакций в узлах и усилий в элементах системы на предыдущем  $i-1$ -м этапе с  $\Delta R_i$ ,  $\Delta N_i$ ,  $\Delta Q_i$  и  $\Delta M_i$  соответственно:

$$R_i = R_{i-1} + \Delta R_i; \quad (2.1)$$

$$N_i = N_{i-1} + \Delta N_i; \quad (2.2)$$

$$Q_i = Q_{i-1} + \Delta Q_i; \quad (2.3)$$

$$M_i = M_{i-1} + \Delta M_i. \quad (2.4)$$

5. На  $i+1$ -м этапе в результате увеличения жёсткости ряда элементов меняется жёсткость системы в целом, т. е.  $K_i$  преобразуется к  $K_{i+1}$  – матрица жёсткости системы на  $i+1$ -м этапе. Отсутствие в ПК функции изменения жёсткости элемента (за счёт изменения геометрических характеристик сечения) приводит к необходимости замены КЭ. Добавляется новый КЭ, моделирующий сечение элемента после усиления, т. к. дополнительная нагрузка  $i+1$ -м этапа в этот момент не добавляется ( $\Delta F_{i+1} = 0$ ), то НДС системы не меняется, а в новом КЭ нулевое НДС.

6. Удаляется КЭ, моделирующий сечение до усиления. До приложения нагрузки  $i+1$ -го этапа НДС системы не претерпевает изменений, для чего вводятся компенсирующие усилия  $i+1$ -го этапа  $F_{i+1}^{comp}$  – вектор-столбец компенсирующих усилий системы на  $i+1$ -м этапе. Значения компенсирующих усилий, прикладываемых в узлах заменяемых элементов, равны соответствующим реакциям усилий  $N_i$ ,  $Q_i$  и  $M_i$ .

7. Приложение нагрузки  $i+1$ -го этапа  $\Delta F_{i+1}$  – вектор-столбец дополнительных приведённых узловых нагрузок системы на  $i+1$ -м этапе.

8. Повторение п. 1...7 расчёта.

### Результаты

В качестве примера представлен расчёт строительной конструкции, один из элементов которой усиливается путём наращивания, без снятия нагрузки (рис. 2). Кроме того, происходит замена шарнирного узла сопряжения стержней на жёсткий. Процесс усиления включает следующие этапы:

1-й этап (рис. 2, а) – формирование НДС в стадии эксплуатации;

2-й этап (рис. 2, б) – усиление одного из элементов конструкции (наращивание сечения), замена шарнирного на жёсткое сопряжение элементов 1 и 2, приложение дополнительной нагрузки.

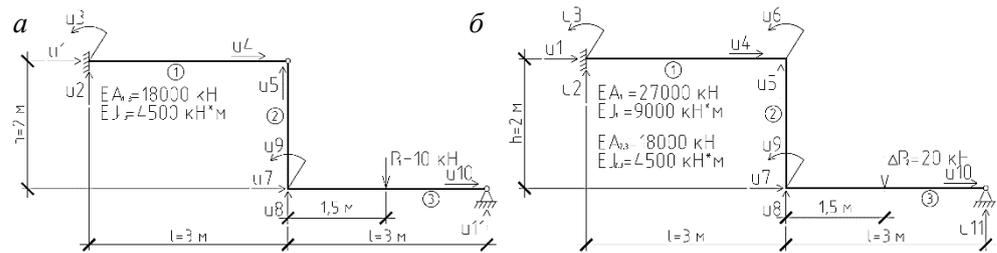


Рис. 2. Расчётная схема:

а – 1-й этап; б – 2-й этап (1, 2, 3 – номера стержней;  $u_1 \dots u_{11}$  – перемещения)

Fig. 2. Schematic of calculations:

а – 1st stage; б – 2nd stage (1, 2, 3 – rod numbers;  $u_1 \dots u_{11}$  – displacements)

Параметры жёсткости сечений элементов (см. п. 1 алгоритма расчёта):

– во всех элементах на 1-м этапе и в элементах 2, 3 на 2-м этапе –  $EA_1 = 18000$  кН,  $EI_1 = 4500$  кН·м<sup>2</sup>;

– в элементе 1 на 2-м этапе –  $EA_2 = 27000$  кН,  $EI_2 = 9000$  кН·м<sup>2</sup>.

Исходя из граничных условий:

– на 1-м этапе –  $u_1 = 0$ ,  $u_2 = 0$ ,  $u_3 = 0$ ,  $u_4 \neq 0$ ,  $u_5 \neq 0$ ,  $u_7 \neq 0$ ,  $u_8 \neq 0$ ,  $u_9 \neq 0$ ,  $u_{10} = 0$ ,  $u_{11} = 0$ . Связь в направлении  $u_6$  отсутствует (шарнирное сопряжение, что в матрице жёсткости системы выражено нулевой строкой и нулевым столбцом);

– на 2-м этапе –  $u_1 = 0$ ,  $u_2 = 0$ ,  $u_3 = 0$ ,  $u_4 \neq 0$ ,  $u_5 \neq 0$ ,  $u_6 \neq 0$ ,  $u_7 \neq 0$ ,  $u_8 \neq 0$ ,  $u_9 \neq 0$ ,  $u_{10} = 0$ ,  $u_{11} = 0$ .

В рамках 1-го этапа матрица жёсткости системы  $K_1$  составит

$$K_1 = \begin{bmatrix} 6000 & 0 & 0 & -6000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 500 & 1500 & 0 & -500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1500 & 4500 & 0 & -1500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -6000 & 0 & 0 & 7687,5 & 0 & 0 & -1687,5 & 0 & 3375 & 0 & 0 \\ 0 & -500 & -1500 & 0 & 9500 & 0 & 0 & -9000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1687,5 & 0 & 0 & 7687,5 & 0 & -3375 & -6000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -9000 & 0 & 0 & 9500 & 1500 & 0 & -500 \\ 0 & 0 & 0 & 3375 & 0 & 0 & -3375 & 1500 & 11250 & 0 & -1500 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6000 & 0 & 0 & 6000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -500 & -1500 & 0 & 500 \end{bmatrix}.$$

Вектор-столбец приведённых узловых нагрузок  $F_1$  примет вид

$$F_1^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -6,875 \ -5,625 \ 0 \ -3,125].$$

Решая уравнение (1), определим перемещения свободных узлов системы (см. п. 2 алгоритма расчёта) на 1-м этапе:  $u_4 = -0,27466$  мм,  $u_5 = -7,80269$  мм,  $u_7 = 0,27466$  мм,  $u_8 = -8,23617$  мм,  $u_9 = 0,76295$ .

Далее (см. п. 3, 4 алгоритма расчёта), исходя из уравнения  $R_1 = K_1 \cdot U_1$ , на основании найденных перемещений определим реакции в узлах элемента на 1-м этапе и, складывая их с реакциями от узловой нагрузки, построим эпюры усилий в системе на 1-м этапе (рис. 3).

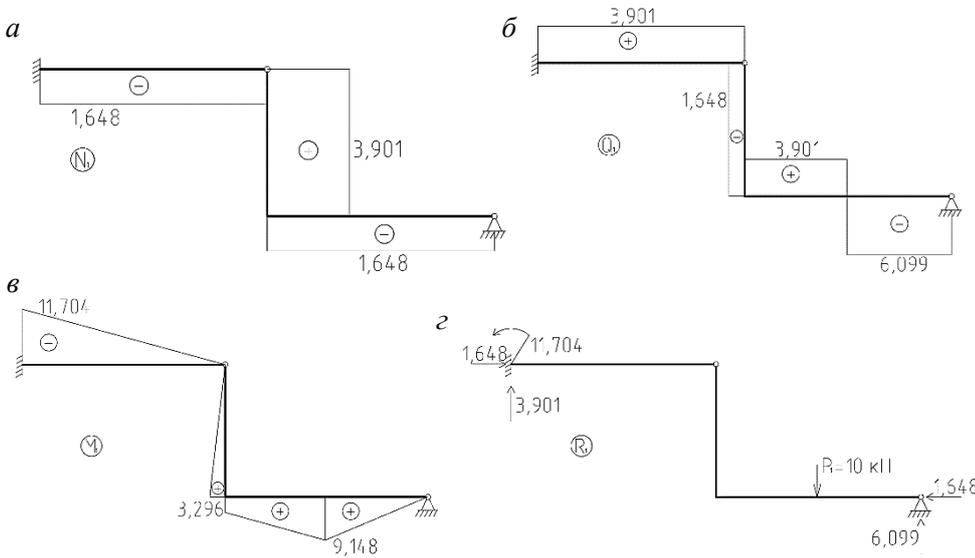


Рис. 3. Эпюры усилий и реакций на 1-м этапе загрузки:  
 а – продольные силы  $N$ ; б – поперечные силы  $Q$ ; в – изгибающие моменты  $M$ ; г –  
 схема нагрузок и реакций  
 Fig. 3. Diagrams of forces and reactions at the 1st stage of loading:  
 а – longitudinal forces  $N$ ; б – transverse forces  $Q$ ; в – bending moments  $M$ ; г –  
 load and response

После набора бетоном усиления требуемой прочности шарнирное сопряжение стержней 1 и 2 становится жёстким, а матрица жёсткости системы преобразуется к виду

$$K_1 = \begin{bmatrix} 9000 & 0 & 0 & -9000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4000 & 6000 & 0 & -4000 & 6000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6000 & 12000 & 0 & -6000 & 6000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -9000 & 0 & 0 & 15750 & 0 & 6750 & -6750 & 0 & 6750 & 0 & 0 \\ 0 & -4000 & -6000 & 0 & 13000 & -6000 & 0 & -9000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6000 & 6000 & 6750 & -6000 & 21000 & -6750 & 0 & 4500 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -6750 & 0 & -6750 & 12750 & 0 & -6750 & -6000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -9000 & 0 & 0 & 9500 & 1500 & 0 & -500 \\ 0 & 0 & 0 & 6750 & 0 & 4500 & -6750 & 1500 & 13500 & 0 & -1500 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6000 & 0 & 0 & 6000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -500 & -1500 & 0 & 500 \end{bmatrix}.$$

После добавления в расчётную схему нового КЭ, моделирующего сечение после усиления, общая матрица жёсткости системы будет равна сумме

матрицы  $K_1$  и локальных матриц жёсткости элементов 1 и 2 с учётом изменения условий их сопряжения и изменения жёсткости элемента 1. Однако, т. к. в этот момент дополнительная нагрузка 2-го этапа ещё не добавляется, т. е.  $\Delta F_2 = 0$ , то НДС системы не меняется, а в добавленном новом элементе 1 усилия и деформации равны 0 (см. п. 5 алгоритма расчёта).

Удаление КЭ, моделирующего сечение до усиления (стержень 1), приводит к матрице жёсткости  $K_2$ . С целью сохранения НДС, как на 1-м этапе, прикладываем компенсирующие усилия 2-го этапа (см. п. 6 алгоритма расчёта):

$$F_2^{comp} = [0 \ 0 \ 0 \ 1,648 \ 3,901 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0],$$

и расчётная схема преобразуется к виду, представленному на рис. 4.

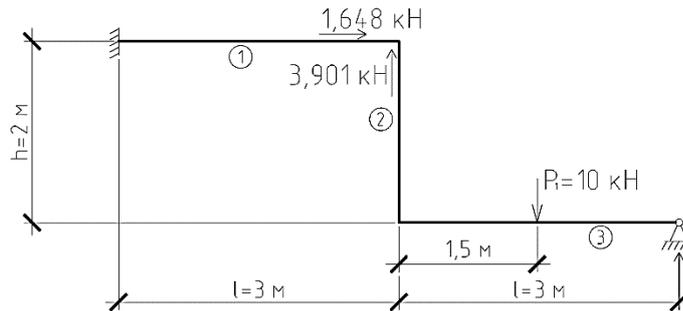


Рис. 4. Расчётная схема с приложением компенсирующих усилий на 2-м этапе  
Fig. 4. Schematic of calculations using compensating forces at the 2nd stage

Эпюры усилий и перемещения узлов системы будут аналогичны этапу 1, но с тем отличием, что в заменённом элементе усилия нулевые (установлен ненапряжённый элемент). Однако, несмотря на изменение сечения элемента на 2-м этапе, напряжения и деформации от нагрузки 1-го этапа в сборной части остаются. После приложения нагрузки 2-го этапа (см. п. 7 алгоритма расчёта)

$$F_2^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -13,75 \ -11,25 \ 0 \ -6,25]$$

дополнительные перемещения узлов системы на 2-м этапе составят:  $\Delta u_4 = 0,55431$  мм,  $\Delta u_5 = -5,58457$  мм,  $\Delta u_6 = -2,01816$ ,  $\Delta u_7 = -0,83147$  мм,  $\Delta u_8 = -6,72117$  мм,  $\Delta u_9 = -0,10671$ .

После определения дополнительных приращений реакций в узлах системы, приращения усилий в элементах системы на 2-м этапе (рис. 5, а) и сложения их с реакциями и усилиями в элементах системы на 1-м этапе получим полные реакции и усилия системы (см. п. 8 алгоритма расчёта) на 2-м этапе (рис. 5, б).

После определения усилий в рамках каждого этапа осуществляется расчёт и конструирование элементов на основании требований норм и правил. При этом необходимо учитывать поэтапное вовлечение в процесс деформирования и восприятия нагрузки усиливаемой части элемента и материала усиления, а усилия 1-го этапа полностью сосредоточиваются в усиливаемой части.

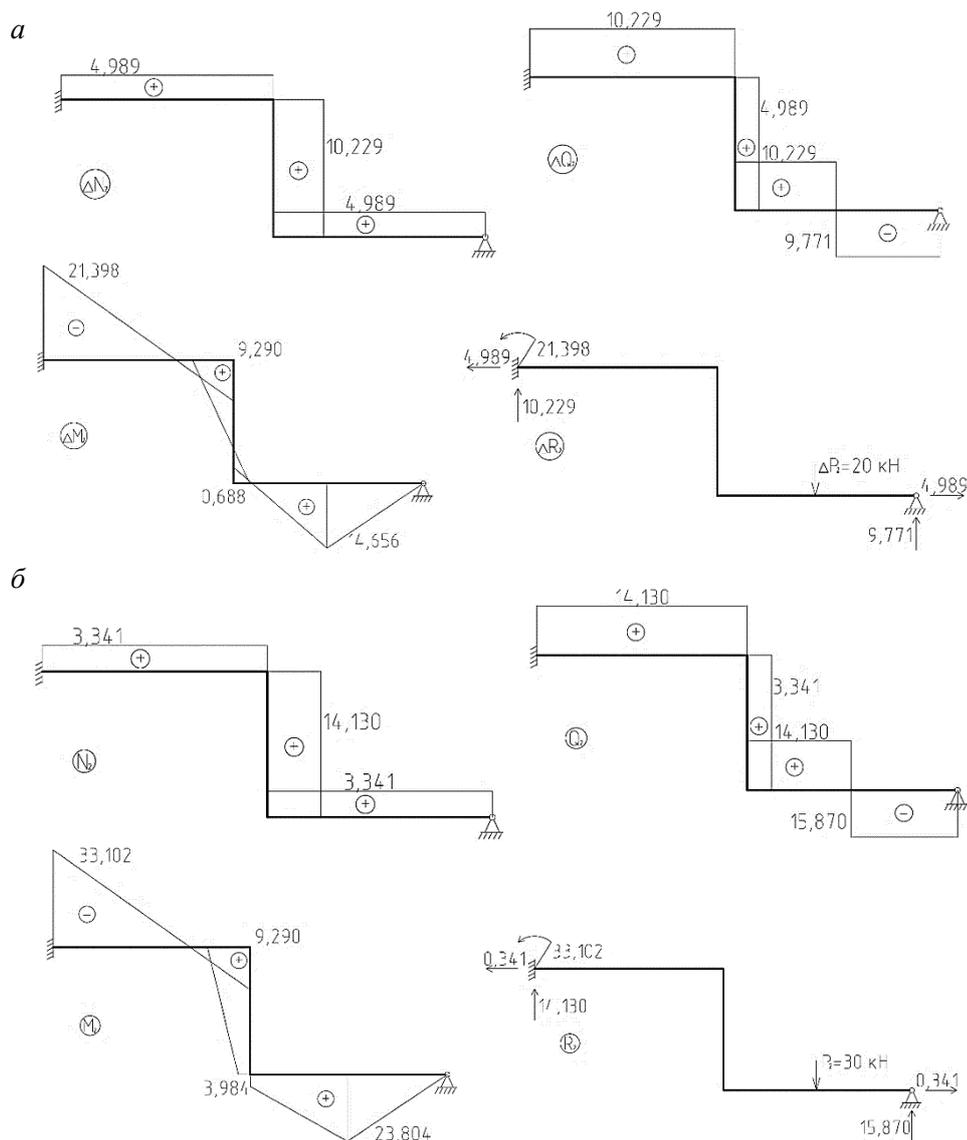


Рис. 5. Эпюры усилий и реакций на 2-м этапе:  
 а – дополнительные приращения; б – полные значения  
 Fig. 5. Diagrams of forces and reactions at the 2nd stage of loading:  
 a – additional increments; b – full values

Предложенный алгоритм расчёта удобен при выполнении расчёта в ПК реконструируемых зданий и сооружений, а также зданий, выполняемых из сборно-монолитного железобетона.

### Выводы

1. Применение МПЭ возможно при условии введения усилий, компенсирующих реакции отбрасываемого элемента.

2. Предложенный алгоритм предназначен для выполнения расчёта реконструируемых и сборно-монолитных зданий и сооружений в ПК, в основе которых заложен МКЭ. При этом учитываются конструктивные особенности, свойственные зданиям в процессе реконструкции и сборно-монолитным зданиям, – включение в процесс деформирования и восприятия нагрузки отдельных частей элементов поэтапно.

3. Выполняя расчёт, необходимо учитывать этапы монтажа, которые оказывают существенное влияние на формирование НДС зданий и сооружений.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Перельмутер А.В.* Беседы о строительной механике. Москва : SCAD Soft : Изд-во АСВ, 2014. 250 с.
2. *Мкртычев О.В., Андреев М.И., Сидоров Д.С.* Анализ изменения усилий в конструкциях при учете стадийности возведения // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2018. Т. 14. № 4. С. 293–298.
3. *Кабанцев О.В., Тамразян А.Г.* Учёт изменений расчётной схемы при анализе работы конструкции // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 5. С. 15–26.
4. *Koyankin A.A., Mitasov V.M.* Stress-strain state of the precast monolithic bent element = Напряжённно-деформированное состояние сборно-монолитного изгибаемого элемента // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. № 97 (5).
5. *Семенюк С.Д., Москалькова Ю.Г.* Прочность и деформативность изгибаемых элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при статическом и малоцикловом нагружениях. Могилёв : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. 274 с.
6. *Лазовский Д.Н.* Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений. Новополоцк : ПГУ, 1998. 240 с.
7. *Коянкин А.А., Митасов В.М.* Напряжённно-деформированное состояние сборно-монолитного элемента с учётом загрузки сборной части // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2021. Т. 23. № 3. С. 129–142.
8. *Кабанцев О.В., Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Перельмутер А.В.* Технология расчётного прогноза напряжённно-деформированного состояния конструкций с учётом истории возведения, нагружения и деформирования // *International scientific journal International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2011. № 7(3). С. 110–117.
9. *Перельмутер А.В., Кабанцев О.В.* Учёт изменения жёсткостей элементов в процессе монтажа и эксплуатации // *Инженерно-строительный журнал*. 2015. № 1. С. 6–14.
10. *Мажид К.И.* Оптимальное проектирование конструкций. Москва : Высшая школа, 1979. 239 с.
11. *Коянкин А.А., Митасов В.М.* Оценка напряжённно-деформированного состояния сборно-монолитных конструкций с учётом процесса монтажа // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2016. № 4. С. 101–107.
12. *Nedviga E., Beresneva N., Gravit M., Blagodatskaya A.* Fire Resistance of Prefabricated Monolithic Reinforced Concrete Slabs of «Marko» Technology // *International scientific conference energy management of municipal transportation facilities and transport EMMFT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018. V. 692. P. 739–749.
13. *Ефреюшин С.В., Макаров А.С.* Расчётный анализ эффективности усиления строительных конструкций, учитывающий стадийность включения дополнительных конструктивных элементов // *Строительная механика и конструкции*. 2020. № 4 (27). С. 26–37.
14. *Полоз М.А., Яссер Гариб Самп, Шевченко А.В.* Применение шагово-итерационного метода при расчёте изгибаемых предварительно напряжённных сборно-монолитных элементов с учётом физической нелинейности // *Строительные материалы и изделия*. 2019. Т. 2. № 3. С. 12–27.
15. *Сикорская О.В., Хегай А.О.* Сравнение эффективности усиления внецентренно сжатых железобетонных колонн при помощи сталефибробетона и железобетона методом двустороннего наращивания // *Вопросы науки и образования*. 2018. № 8 (20). С. 24–29.

## REFERENCES

1. *Perelmuter A.V.* Conversations about structural mechanics. Moscow: SCAD. 2014. 250 p. (In Russian)
2. *Mkrtychev O.V., Andreev M.I., Sidorov D.S.* Analysis of forces in structures at construction stages. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii*. 2018; 14 (4): 293–298. (In Russian)
3. *Kabantsev O.V., Tamrazyan A.G.* Changes in design scheme in analyzing structural operation. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2014; (5): 15–26. (In Russian)
4. *Koyankin A.A., Mitasov V.M.* Stress-strain state of the precast monolithic bent element. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 97 (5).
5. *Semenyuk S.D., Moskalkova Yu.G.* Strength and deformability of bent elements reinforced by compressed zone expansion under static low-cycle loads. Mogilev: Byelorussian-Russian University, 2017. 274 p. (In Russian)
6. *Lazovsky D.N.* Reinforcement of reinforced concrete structures of operating buildings. Novopolotsk, 1998. 240 p. (In Russian)
7. *Koyankin A.A., Mitasov V.M.* Stress-strain state of cast-in-place and precast structure with loaded cast-in-place element. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23 (3): 129–142. (In Russian)
8. *Kabantsev O.V., Karpilovsky V.S., Kriksunov E.Z., Perelmuter A.V.* Computational prediction of stress-strain state of structures with regard to erection, loading and deformation. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2011; 7 (3): 110–117.
9. *Perelmuter A.V., Kabantsev O.V.* Consideration of changes in the stiffness of elements during installation and operation. *Civil Engineering magazine*. 2015; (1): 6–14. (In Russian)
10. *Mazhid K.I.* Optimum structural design. Moscow: Vysshaya shkola, 1979. 237 p. (In Russian)
11. *Koyankin A.A., Mitasov V.M.* Stress-strain state of prefabricated monolithic structures during installation process. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2016; (4): 101–107. (In Russian)
12. *Nedviga E., Beresneva N., Gravit M., Blagodatskaya A.* Fire resistance of prefabricated monolithic reinforced concrete slabs of "Marko" technology. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018; 692: 739–749.
13. *Efryushin S.V., Makarov A.S.* Computational analysis of building reinforcement effectiveness at stage-by-stage loading of additional structural elements. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 4 (27): 26–37. (In Russian)
14. *Poloz M.A., Yasser Garib Sami, Shevchenko A.V.* Step-iterative method in calculating bent prestressed cast-in-situ elements at physical nonlinearity. *Stroitel'nye materialy i izdeliya*. 2019; 2 (3): 12–27. (In Russian)
15. *Sikorskaya O.V., Hegai A.O.* Reinforcement efficiency of eccentrically loaded columns using steel-fiber concrete and reinforced concrete assessed by bilateral expansion method. *Voprosy nauki i obrazovaniya*. 2018; 8 (20): 24–29. (In Russian)

**Сведения об авторе**

*Коянкин Александр Александрович*, канд. техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, KoyankinAA@mail.ru

**Authors Details**

*Aleksandr A. Koyankin*, PhD, A/Professor, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia, KoyankinAA@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.01.2024  
Одобрена после рецензирования 19.02.2024  
Принята к публикации 01.03.2024

Submitted for publication 17.01.2024  
Approved after review 19.02.2024  
Accepted for publication 01.03.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 2. С. 80–92.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (2): 80–92.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 622.692.4: 539.43

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-80-92

EDN: EHTBLM

## ОЦЕНКА ЗАДАННОГО УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЕВ ПРИЕМЛЕМОСТИ РИСКА

Олег Александрович Курасов<sup>1</sup>, Петр Владимирович Бурков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский

Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия

**Аннотация.** *Актуальность.* Оценка надежности системы газопроводов – одна из наиболее важных задач, поскольку безопасность поставок газа неразрывно связана с надежной работой всей системы в целом.

*С целью* обеспечения заданного уровня надежности газопроводных систем в настоящем исследовании описана методика оценки приемлемого уровня риска, которая устанавливается в соответствии с действующими нормами и стандартами.

*Методы исследования.* Применяется трехкомпонентная методика оценки заданного уровня надежности газопроводных систем. Она реализуется путем создания модели последствий отказа, которая учитывает условия окружающей среды и характеристики газопроводов. Далее определяются приемлемые вероятности отказа трубопровода с помощью теории риска. На основе этих данных создается модель для оценки надежности транспортировки газа в системе газопроводов с учетом вероятности отказа и гидравлических характеристик.

*Результаты.* Определяется заданный уровень надежности системы на основе допустимой вероятности отказа. Полученное значение надежности сравнивается с фактическим уровнем надежности реальной системы газопроводов. Определен оптимальный вариант действий для обеспечения и повышения надежности системы на основе сделанных выводов.

**Ключевые слова:** риск, надежность, моделирование отказов, газопровод, безопасность

**Для цитирования:** Курасов О.А., Бурков П.В. Оценка заданного уровня надежности сложных технических систем на основе критериев приемлемости риска // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 80–92. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-80-92. EDN: EHTBLM

## ORIGINAL ARTICLE

**EVALUATION OF RELIABILITY OF COMPLEX ENGINEERING SYSTEMS USING RISK ACCEPTANCE CRITERIA****Oleg A. Kurasov<sup>1</sup>, Petr V. Burkov<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*<sup>2</sup>*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

**Abstract.** The reliability evaluation of gas pipeline systems is one of the most important tasks, since the safety of gas supplies determines the reliable operation of the whole system.

**Purpose:** This paper presents the evaluation methodology based on the risk acceptance criteria established in accordance with the current rules and standards.

**Methodology:** A three-component methodology is used to evaluate the reliability level of gas pipeline systems. It is implemented by creating a model of failure consequences, which accounts for environmental conditions and pipeline properties. Acceptable probabilities of the pipeline failure are determined using the risk theory. Based on these data, the model is designed to assess the gas transport reliability in the pipeline system with regard to failure probabilities and hydraulic characteristics.

**Research findings:** The reliability level of the system is determined using the acceptable failure probability. The obtained reliability is compared with that of the real pipeline system. The best procedure is proposed to maintain and improve the system reliability.

**Keywords:** risk, reliability, failure modelling, pipeline, safety

**For citation:** Kurasov O.A., Burkov P.V. Evaluation of reliability of complex engineering systems using risk acceptance criteria. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 80–92. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-80-92. EDN: EHTBLM

**Введение**

В современной промышленности вопрос обеспечения надежности газопроводов приобретает особую актуальность. Эффективность эксплуатации магистральных газопроводов напрямую зависит от их надежности и безопасности, что в значительной степени предопределяет экономическую стабильность и экологическую безопасность регионов. В этой связи научное исследование, направленное на разработку методики определения заданного уровня надежности газопроводов на основе критериев приемлемости риска, становится особенно значимым.

Цель настоящей статьи – представить комплексный подход к оценке надежности газопроводов, который позволит с учетом специфических условий эксплуатации определять оптимальные параметры их работы. Методика, разработанная в рамках исследования, базируется на современных принципах управления рисками и предусматривает комплексный анализ потенциальных опасностей и уязвимостей газопроводных систем.

Акцент делается на критериях приемлемости риска, которые являются ключевым элементом в процессе обеспечения надежности. Эти критерии позволяют не только оценивать вероятность возникновения нежелательных событий, но и эффективно управлять рисками, минимизируя потенциальные последствия аварийных ситуаций.

Достаточно быстро развивающаяся «зеленая» низкоуглеродная экономическая политика газодобывающих компаний резко повысила значение газа как посредника между новыми источниками энергии и сильно загрязняющим окружающую среду ископаемым топливом [1, 2, 3]. Безопасная и стабильная транспортировка углеводородов тесно связана с эффективным функционированием системы газопроводов, которые служат важнейшим связующим звеном между поставками газа и рынками [4, 5]. В последнее время отечественные и международные эксперты уделяют особое внимание изучению надежности систем транспорта углеводородов. Результатом стала разработка большого количества методик, внедрение системы измерения надежности и создание протоколов оценки надежности [6–13]. Тем не менее недостаточная изученность заданного уровня надежности является существенным препятствием для практического использования теории надежности в системе транспорта газа. Поэтому для оценки надежности газовых магистралей необходимо понимать заданный уровень надежности при проектировании.

Исчерпывающий и актуальный обзор литературы позволяет выявить области, в которых отсутствует информация или, наоборот, присутствуют некие пробелы в понимании проблемы безопасности транспортировки углеводородов, а также определить современное состояние исследований, имеющих непосредственное отношение к проблематике рисков отказов в сложных технических системах, которыми являются газопроводы.

В настоящее время существует два утвержденных метода оценки надежности: статистический подход, основанный на исторических данных, и подход, основанный на оценке риска. Первый метод предполагает использование данных об отказах, полученных из баз данных об инцидентах. Статистические подходы, несмотря на их гибкость, обрабатывают большие объемы информации и должны оперировать актуальными данными своей постоянно обновляемой информационной базы. Например, в части трубопроводного транспорта природного газа это Управление по безопасности трубопроводов и опасным материалам (PHMSA), Европейская группа по расследованию аварий на газопроводах (EGIG) и др. Такие данные применяются для определения средней исторической вероятности отказов. Для их эффективного использования на практике необходимо скорректировать среднюю историческую вероятность отказа с учетом изменений в классификации безопасности, условиях эксплуатации и параметрах конструкции трубопровода. Заданный уровень надежности определяется путем вычитания единицы из максимально допустимой вероятности отказа после учета средней исторической вероятности отказа [14].

В табл. 1 представлена методология DNV-RP-F101, в которой учитывается исключительно влияние коррозии на наземные и морские трубопроводы при определении максимально допустимой вероятности отказа для четырех категорий безопасности (DNV, 2009). В табл. 2 показано, как стандарт ISO 16708 устанавливает желаемый уровень надежности трубопроводов для нескольких сценариев отказа, включая разрыв и утечку крупномасштабных наземных газопроводов (EGIG, 2020; ISO, 2006). Так, в стандарте ISO 16708 используются два конкретных набора исторических данных об интенсивности отказов: данные Европейской группы данных об инцидентах на трубопроводах (EGIG)

и данные Министерства транспорта (DOT). В 2016 г. Хассаньен [15] представил методику определения заданного уровня надежности. Метод предполагает вычисление вероятности отказа непосредственно в момент отказа и корректировку предыдущих случаев отказа. Тем не менее такой статистический подход может оказаться слишком консервативным и привести к увеличению экономических расходов.

Таблица 1

**Класс безопасности и годовая целевая надежность трубопровода для конечного предельного состояния в DNV-RP-F101**

Table 1

**Safety class and annual pipeline reliability for limiting state according to DNV-RP-F101**

Класс безопасности	Годовая максимально допустимая вероятность отказа
Очень высокий	$< 1 \cdot 10^{-6}$
Высокий	$< 1 \cdot 10^{-5}$
Средний	$< 1 \cdot 10^{-4}$
Низкий	$< 1 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2

**Целевая надежность трубопровода в стандарте ISO 16708**

Table 2

**Pipeline reliability according to ISO 16708**

Причина отказа	Отчетность DOT		EGIG:2001	
	Количество отказов на км/г.	% от общего количества	Количество отказов на км/г.	% от общего количества
Внешняя коррозия	$0,16 \cdot 10^{-4}$	15	$0,03 \cdot 10^{-4}$	1
Влияние оборудования	$0,51 \cdot 10^{-4}$	49	$1,16 \cdot 10^{-4}$	75
Другие	$0,37 \cdot 10^{-4}$	36	$0,52 \cdot 10^{-4}$	24
Всего	$1,04 \cdot 10^{-4}$	100	$2,16 \cdot 10^{-4}$	100

Предлагаемые во втором методе стратегии учитывают безопасность жизнедеятельности при определении надежности сложной технической системы. Т. Циммерман [16] представил первоначальный подход к оценке надежности наземных трубопроводов, основанный на теории риска. В основе этой стратегии лежит степень готовности общества к принятию риска и влияние аварий на близлежащие районы. Автор разработал кривые надежности для трубопроводов, включая как социальные, так и индивидуальные риски. Включение показателей антипатии риска и класса местоположения еще больше подчеркнуло необходимость учета как общественных, так и индивидуальных критериев приемлемости риска. Кроме того, были собраны данные о трубопроводах и разработаны модели для анализа последствий различных аварий и сбоев. В стандарте CSA Z662 был реализован подход, предложенный Т. Циммерманом и М. Нес-

символ. В работе [17] Чжан использовал подход, основанный на оценке рисков, для исследования 37 000 км трубопроводов и разработал 148 эксплуатационных критериев, чтобы предложить заданный уровень надежности исследуемых объектов транспорта углеводородов. Кроме того, Ли [18, 19] представил специальную функцию заданной надежности, разработанную для трубопроводов. Тем не менее важно отметить, что второй подход не учитывает экономический риск.

Опубликованные ранее работы демонстрируют два ограничения. Во-первых, учет экологических и экономических рисков не осуществляется. Во-вторых, эти методики относятся исключительно к оценке заданного уровня надежности трубопроводов и неприменимы к системе газопроводов.

В настоящей статье описан метод оценки заданного уровня надежности сложной технической системы на примере конкретного газопровода с использованием заранее определенных критериев приемлемости риска, призванный устранить эти проблемы. Кроме того, ниже приводится полный перечень всех разработок, представленных в данном исследовании:

1. Описано предложение по установлению меры надежности для трубопроводных систем, транспортирующих газ.

2. Рассмотрена методология оценки заданной надежности для наземных газопроводов с учетом потенциальных рисков для экономики, общества и населения. Кроме того, в связи с возможными финансовыми последствиями экологический аспект также относится к категории экономических рисков.

3. Предложена методика определения заданного уровня надежности инфраструктуры газопроводов.

### **Постановка задачи, методы исследования**

Заданный уровень надежности сложных технических систем – это способность успешно выполнять плановые задачи по транспортировке газа в установленные сроки и при заданных условиях. В статье описывается методология определения уровня надежности путем интеграции критериев приемлемости риска с моделью оценки надежности.

Подход состоит из трех основных компонентов. Критерии приемлемости риска устанавливаются в соответствии с существующими стандартами, нормативно-правовыми актами, а также данными, полученными в ходе экспериментальных исследований и практического применения различных методов оценки надежности газопроводов. Затем строится модель последствий отказов с учетом характеристик и условий эксплуатации трубопровода. Далее рассчитывается допустимое количество отказа с использованием принципов теории риска. В итоге создается оценочная модель для анализа надежности транспорта газа. Модель использует максимально допустимую вероятность отказа для обеспечения заданного уровня надежности, принимая во внимание гидравлические и отказоустойчивые свойства трубопроводной системы.

Ниже рассматривается порог приемлемости риска, который включает в себя общественные, индивидуальные и экономические факторы. Соотношение между вероятностью инцидента на сети трубопроводов и масштабом его воздействия на близлежащие населенные районы определяет уровень общественного риска. Индивидуальный риск определяет уровень воздействия ин-

цидентов на трубопровод, которому подвергаются лица, находящиеся в непосредственной зоне риска. Финансовые последствия, с которыми могут столкнуться операторы трубопроводов в результате инцидентов на трубопроводах, известны как экономический риск (EGIG, 2020) [20].

Кривая  $F-N$  обычно используется для изображения критериев приемлемости как индивидуального, так и общественного риска, в то время как фиксированное ожидание представляет собой установленный уровень ожидания риска аварии на трубопроводе. Взаимосвязь между числом погибших ( $N$ ) и частотой ( $F$ ) событий, приводящих к гибели  $N$  или более человек, отображается кривой  $F-N$ , построенной в логарифмическом масштабе. М. Нессим дает точное объяснение кривой  $F-N$  в своей публикации 2009 г. [21].

$$P_{fN}(x) = 1 - F_N(x) < \frac{C}{x^a}. \tag{1}$$

Здесь  $P_{fN}(x)$  обозначает вероятность отказа в конкретной ситуации;  $F_N(x)$  – кумулятивная функция распределения (на км/г.) происшествий, которые приводят к предполагаемому количеству смертей, равному  $x$ ;  $C$  и  $a$  – константы, соответствующие коэффициенту антипатии риска (предусматривающему подготовку к риску или потенциальной угрозе) и допустимому уровню риска соответственно.

Как и кривая  $F-N$ , кривая  $P-L$  учитывает неприятие крупных событий и используется в качестве стандарта для оценки экономического риска.

$$P_{fL}(e) = 1 - F_L(e) < \frac{B}{(3 \log_{10} e - 14)^n}. \tag{2}$$

В данном контексте переменная  $e$  представляет собой годовой экономический ущерб, руб., вызванный отказом системы или отдельных ее элементов. Константы  $B$  и  $n$  отражают коэффициент антипатии риска и допустимый уровень риска соответственно.  $P_{fL}(e)$  обозначает вероятность отказа.  $F_L(e)$  представляет собой кумулятивную функцию распределения экономических потерь на км/г. Учитывая, что экономическая приемлемость риска снижается по мере увеличения тяжести повреждений трубопровода, необходимо увеличить значение  $n$ . В табл. 3 представлены значения параметров  $n$  и  $B$  с учетом стандарта категоризации аварийных событий и уровня экономического развития.

Таблица 3

**Параметры кривой  $P-L$**

Table 3

**$P-L$  curve parameters**

Классификация инцидентов	Экономический ущерб (руб.)	$n$	$B$
Общий инцидент	$e \leq 1 \cdot 10^5$	0	$10^{-4}$
Общий инцидент	$1 \cdot 10^5 < e \leq 1 \cdot 10^6$	1	$10^{-4}$
Существенный инцидент	$1 \cdot 10^6 < e \leq 5 \cdot 10^6$	1,5	$10^{-4}$
Крупный инцидент	$5 \cdot 10^6 < e \leq 1 \cdot 10^7$	2	$10^{-4}$
Особо значимый инцидент	$1 \cdot 10^7 < e$	2	$10^{-4}$

Разрушение газопровода может привести к образованию взрывоопасных паров, способных вызвать пожар или взрыв. Это, в свою очередь, незамедлительно приведет к гибели людей в соседних населенных пунктах или операторов, а также к значительным экономическим потерям. При оценке заданного уровня надежности крайне важно учитывать последствия социальных, личных и экономических рисков.

Многие модели рисков учитывают влияние незапланированных выбросов на прилегающие населенные пункты. Для оценки количества погибших в этих моделях используются такие факторы, как опасная зона, плотность населения, объемы утекшего газа, вероятность воспламенения и риск летального исхода [22].

Экономические последствия катастроф на трубопроводах включают в себя снижение прибыли от производства и расходы, связанные с ремонтом поврежденного участка трубы. Кроме того, выброс углеводородов потенциально может привести к гибели людей, уничтожению имущества и экологическим последствиям, решение которых требует финансовых затрат. При оценке экономических последствий аварий на трубопроводах учитываются четыре различных фактора: материальный ущерб, компенсационные издержки, экологический ущерб и дополнительные прочие расходы. Кроме того, размер экономического ущерба значительно варьируется в зависимости от серьезности аварии.

Под системой газопроводов понимается совокупность трубопроводных сетей, опасных производственных объектов, промышленной инфраструктуры и оборудования, используемых для транспортировки углеводородов от места добычи до конечного пункта потребления.

Надежность транспорта углеводородов – это способность трубопроводной системы удовлетворять потребности клиентов в газе в соответствии с заранее установленными целями и критериями. Уравнение (3) является исходным предложением показателя надежности сложных технических систем, обозначаемого в данном разделе как  $R_{system}$ , который определяется размерностью количества.

$$R_{system} = \frac{\sum_{i=1}^T I_i}{T}, I_i = \begin{cases} 1, \sum_{k=1}^n X_{ik} \geq \sum_{k=1}^n D_{ik} \\ \frac{\sum_{k=1}^n X_{ik}}{\sum_{k=1}^n D_{ik}} \end{cases}, \quad (3)$$

где  $T$  – время выполнения задания, день;  $X_{ik}$  – количество природного газа, поставленного в  $i$ -й день через систему газопроводов  $k$ -му потребителю;  $D_{ik}$  – потребность в природном газе  $k$ -го потребителя в  $i$ -й день; подстрочный индекс  $i$  обозначает момент, день; подстрочный индекс  $k$  – конкретного потребителя.

Моделирование процесса перехода системы из одного состояния в другое основывается на последовательном методе Монте-Карло, использующем расчетные значения заданного уровня надежности. Для оценки изменения фактического расхода проводится гидравлический анализ турбулентного потока при

переходе системы из одного состояния в другое с помощью программного обеспечения. Показатели надежности получены путем объединения гидравлического анализа с моделированием процессов перехода из одного состояния в другое. Кроме того, надежность системы газопроводов определяется с учетом целей обеспечения надежности поставок газа. Чтобы определить заданный уровень надежности, необходимо выполнить следующие действия:

1. Обеспечить критерий оценки надежности.
2. Получить основные сведения о газопроводах.
3. Выявить последствия отказа.
4. Определить заданный уровень надежности газопроводов.
5. Выполнить моделирование стохастического процесса перехода состояний для системы газопроводов.
6. Определить объемы газа, поставляемого по газопроводной магистрали.
7. Определить заданную степень надежности газопроводных систем.

**Обсуждение результатов исследования**

Исследуемый прототип газопроводной системы включает в себя одну терминальную станцию, 32 станции блочной арматуры, 4 станции отбора и 4 компрессорные станции. Трубопроводная система состоит из 40 отдельных сегментов, каждый из которых обладает отличительными характеристиками, представленными в табл. 4. Трубопроводная система присваивает пяти распределительным узлам целочисленные идентификаторы от 1 до 5. Соответствующие данные приведены в табл. 5, 6.

Таблица 4

**Информация о пяти распределительных узлах**

Table 4

**Parameters of five distributive pipeline nodes**

Распределительный узел	Расположение, км	$Q_{dist}$ , Нм <sup>3</sup> /ч	$V_{dist}$ , млрд м <sup>3</sup>	$P_{min}$ , МПа
1	291,96	6164,21	0,053	4
2	404,22	38 638,58	0,368	3,5
3	849,58	22 387,5	0,226	3,5
4	905,6	25 630,18	0,224	3,5
5	928,6	329 196,7	2,869	3
Итого	–	422 017,14	3,74	–

Таблица 5

**Характеристики трубопроводов**

Table 5

**Pipeline parameters**

Параметр	Значение
Диаметр, мм	660
Толщина, мм	7,1
Проектное давление, МПа	6,5

Таблица 6

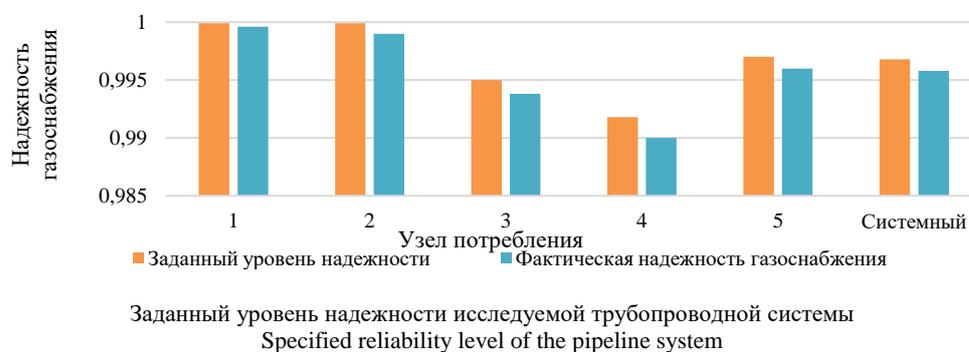
## Длина и класс участков трубопроводов

Table 6

## Length and class of pipeline sections

Участок	Длина, км	Класс	Участок	Длина, км	Класс	Участок	Длина, км	Класс
1	30,8	1	15	26,8	1	29	24,5	2
2	29,2	1	16	31,8	1	30	25,8	2
3	28,9	1	17	27,8	1	31	27,5	2
4	24,9	2	18	20,6	1	32	25,2	2
5	3,1	2	19	22,5	1	33	25,1	2
6	19,7	2	20	3,5	1	34	26,1	2
7	19,1	2	21	27,8	1	35	20,0	3
8	20,4	2	22	29,6	1	36	14,9	3
9	30,9	1	23	30,8	1	37	15,8	3
10	27,9	1	24	29,5	1	38	16,9	3
11	32,8	1	25	32,6	1	39	4,4	3
12	31,7	1	26	31,6	1	40	23,5	3
13	4,1	1	27	34,8	1	–	–	–
14	27,8	1	28	34,8	1	–	–	–

Заданный уровень надежности оценивается с помощью реальной трубопроводной системы, а полученное значение сравнивается с фактическим значением надежности. Трубопроводы и компрессорные станции являются составными частями модели оценки надежности, при этом вероятность отказа каждого отдельного компонента системы вводится в расчетную модель. Таким образом, исследуемая трубопроводная система подвергается моделированию стохастического процесса перехода состояний, чтобы определить состояние и срок службы каждого блока в течение годового периода. Перекачка газа из системы определяется с помощью программного обеспечения и гидравлического анализа нестационарного потока, который учитывает переходы системы в различные состояния. Из данных рисунка следует, что расчет показателей надежности осуществляется путем интеграции моделирования переходного процесса в состояние с анализом гидравлических характеристик. Кроме того, показано сравнение между заданным и фактическим уровнями надежности транспортировки газа.



Независимо от того, рассматривается ли надежность для отдельных узлов потребителей или для всей системы, на основании анализа данных рисунка фактическая надежность трубопроводной системы ниже запланированного значения надежности транспорта газа. Поэтому исследуемая сеть газопроводной магистрали должна внедрить необходимые протоколы безопасности для снижения риска и повышения способности выполнять свою функцию по транспорту углеводородов.

Наиболее подходящим дальнейшим планом действий для повышения надежности является тот, который соответствует выводам, сделанным в результате сравнения. Во-первых, необходимо увеличить экономические ресурсы, выделяемые на содержание и обслуживание газопроводов, чтобы обеспечить оперативный ремонт и замену всех поврежденных участков труб. Во-вторых, оптимизировать стратегию эксплуатации системы газопроводов. Одной из дополнительных мер также является увеличение количества запасных частей для отдельных элементов сети газопроводов.

### Заключение

Таким образом, представлен метод оценки надежности системы газопроводов, а также подтверждения соблюдения стандартов приемлемости риска. Подход базируется на трех составляющих: оценка надежности, расчет приемлемой вероятности и последствий отказов, а также установление критериев приемлемости рисков.

Кроме того, адекватность и целесообразность данного подхода оценивается путем сравнения заданных и фактических значений надежности на действующей системе трубопроводного транспорта газа. Предлагаются рекомендации по повышению надежности газоснабжения, основанные на сравнении фактического и предполагаемого уровня надежности.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gong J., Kang Q., Wu H., Li X., Shi B., Song S. Application and prospects of multi-phase pipeline simulation technology in empowering the intelligent oil and gas fields // *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2023. V. 3 (3). P. 100127. Doi.org/10.1016/j.jpse.2023.100127
2. Huang W., Li Y., Yu W., Yu H., Shan X., Wang H., Gong J. An evaluation index system of the user satisfaction for the natural gas pipeline network // *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2021. V. 1 (4) P. 452–458.
3. Zhu Y.Q., Wang P., Wang Y., Tong R.K., Yu B., Qu Z.G. Assessment method for gas supply reliability of natural gas pipeline networks considering failure and repair // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021. V. 88 (2). P. 103817. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.103817
4. Liu Y., Zhou W. Uncertainties in internal pressure of oil transmission pipelines and implications for the reliability analysis // *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2022. V. 2 (2). P. 100055. <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2022.100055>
5. Yu W.C., Gong J., Huang W.H., Liu H.F., Dang F.H., Luo J.L., Sun Y.H. A systematic methodology to assess hydraulic reliability and gas supply reliability of the natural gas pipeline network // *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME*. 2021. V. 143 (4). DOI: 10.1115/1.4049711
6. Chen Q., Zuo L.L., Wu C.C., Cao Y.K., Bu Y.R., Chen F., Sadiq R. Supply reliability assessment of a gas pipeline network under stochastic demands // *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. V. 209. P. 107482. DOI: 10.1016/j.ress.2021.107482

7. Li Y.C., Gong J., Yu W.C., Huang W.H., Wen K. Gas supply reliability analysis of a natural gas pipeline system considering the effects of demand side management // *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME*. 2021. V. 143 (4). DOI:10.1115/1.4049743
8. Li Y.C., Gong J., Yu W.C., Huang W.H., Wen K. Gas supply reliability analysis of a natural gas pipeline system considering the effects of demand side management // *Proceedings of the ASME 2020 Pressure Vessels & Piping Conference (PVP 2020)*. 2020. V. 8. DOI: 10.1115/PVP2020-21218
9. Safipour H., Abdollahi A., Hajmohammadi M., Alizadeh M.I. Optimal demand response strategies to mitigate wind power variability and gas-supply uncertainty in a multi-resolution robust security constrained unit commitment // *Iet Generation Transmission & Distribution*. 2020. V. 14 (14). P. 2740–2750.
10. Su H., Zio E., Zhang J., Li X., Chi L., Fan L., Zhang Z. A method for the multi-objective optimization of the operation of natural gas pipeline networks considering supply reliability and operation efficiency // *Computers & Chemical Engineering*. 2019. V. 131. P. 106584. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2019.106584
11. Yu W. Study on the gas supply reliability of natural gas pipeline networks based on demand side analysis. Beijing : China University of Petroleum, 2019.
12. Yu W.C., Huang W.H., Wen Y.H., Li Y.C., Liu H.F., Wen K., Gong J., Lu Y.A. An integrated gas supply reliability evaluation method of the large-scale and complex natural gas pipeline network based on demand-side analysis // *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. V. 212. P. 212:107651. DOI: 10.1016/j.res.2021.107651
13. Popov G., Bolobov V., Zhuikov I., Zlotin V. Development of the Kinetic Equation of the Groove Corrosion Process for Predicting the Residual Life of Oil-Field Pipelines // *Energies*. 2023. V. 16 (20). P. 7067.
14. Gong C., Frangopol D.M. Time-variant hull girder reliability considering spatial dependence of corrosion growth, geometric and material properties // *Reliability Engineering & System Safety*. 2020. V. 193. P. 106612.
15. Hassanien S., Leblanc L., Nemeth A. Towards an acceptable pipeline integrity target reliability // 11th International Pipeline Conference. IPC 2016. American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2016.
16. Zimmerman T., Nessim M., McLamb M., Rothwell B., Zhou J., Glover A. Target reliability levels for onshore gas pipelines // *Proceedings of the 4th International Pipeline Conference*. Calgary, Alta, 2002. P. 845–854.
17. Zhang J., Zhang Z., Yu Z., Wu W., Chen Y. Building a target reliability adaptive to China onshore natural gas pipeline // 10th International Pipeline Conference, IPC 2014. American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2014.
18. Lee J.-H., Kim J.-H., Young-Do J., Hyun K.L. Application of target reliability levels for maintenance of domestic natural gas pipelines // *Journal of The Korean Institute of Gas*. 2018. V. 22 (3). P. 1–6.
19. Lee J.-H., Young-Do J., Moon J.-S. A study on establishing target reliability levels for flammable gas transmission pipelines // *Journal of The Korean Institute of Gas*. 2018. V. 22 (6). P. 52–58.
20. Gong C., Frangopol D.M., Cheng M. Risk-based life-cycle optimal dry-docking inspection of corroding ship hull tankers // *Engineering Structures*. 2019. V. 195. P. 559–567.
21. Nessim M., Zhou W., Zhou J., Rothwell B., McLamb M. Target reliability levels for design and assessment of onshore natural gas pipelines // *International Pipeline Conference : proceedings of the 5th Biennial International Pipeline Conference : presented at the International Pipeline Conference (IPC 2004) : Calgary, Alberta, Canada, October 4–8, 2004*. P. 2501–2512.
22. Kurasov O.A., Burkov P.V. Substantiation of methods of improving safety of pipeline gas transportation // *E3S Web of Conferences : 2021 Topical Issues of Rational Use of Natural Resources, TI 2021, Saint Petersburg*. EDP Sciences. 2021. V. 266. DOI: 10.1051/e3sconf/202126601012. EDN: VJQECF

## REFERENCES

1. Gong J., Kang Q., Wu H., Li X., Shi B., Song S. Application and prospects of multi-phase pipeline simulation technology in empowering the intelligent oil and gas fields. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2023; 3 (3): 100127. Doi.org/10.1016/j.jpse.2023.100127

2. Huang W., Li Y., Yu W., Yu H., Shan X., Wang H., Gong J. An evaluation index system of the user satisfaction for the natural gas pipeline network. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2021; 1 (4): 452–458.
3. Zhu Y.Q., Wang P., Wang Y., Tong R.K., Yu B., Qu Z.G. Assessment method for gas supply reliability of natural gas pipeline networks considering failure and repair. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021; 88: 103817. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.103817
4. Liu Y., Zhou W. Uncertainties in internal pressure of oil transmission pipelines and implications for the reliability analysis. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2022; 2 (2): 100055. <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2022.100055>
5. Yu W.C., Gong J., Huang W.H., Liu H.F., Dang F.H., Luo J.L., Sun Y.H. A Systematic Methodology to Assess Hydraulic Reliability and Gas Supply Reliability of the Natural Gas Pipeline Network. *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME*. 2021; 143 (4). DOI: 10.1115/1.4049711
6. Chen Q., Zuo L.L., Wu C.C., Cao Y.K., Bu Y.R., Chen F., Sadiq R. Supply reliability assessment of a gas pipeline network under stochastic demands. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021; 209: 107482. DOI: 10.1016/j.res.2021.107482
7. Li Y.C., Gong J., Yu W.C., Huang W.H., Wen K. Gas supply reliability analysis of a natural gas pipeline system considering the effects of demand side management. *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME*. 2021; 143 (4): 107482. DOI: 10.1016/j.res.2021.107482
8. Li Y.C., Gong J., Yu W.C., Huang W.H., Wen K. Gas supply reliability analysis of a natural gas pipeline system considering the effects of demand side management. In: *Proc. ASME 'Pressure Vessels & Piping Conference'*. 2020; 8. DOI: 10.1115/PVP2020-21218
9. Safipour H., Abdollahi A., Hajmohammadi M., Alizadeh M.I. Optimal demand response strategies to mitigate wind power variability and gas-supply uncertainty in a multi-resolution robust security constrained unit commitment. *IET Generation Transmission & Distribution*. 2020; 14 (14): 2740–2750.
10. Su H., Zio E., Zhang J., Li X., Chi L., Fan L., Zhang Z. A method for the multi-objective optimization of the operation of natural gas pipeline networks considering supply reliability and operation efficiency. *Computers & Chemical Engineering*. 2019; 131: 106584. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2019.106584
11. Yu W. Study on the gas supply reliability of natural gas pipeline networks based on demand side analysis. China University of Petroleum, Beijing, 2019.
12. Yu W.C., Huang W.H., Wen Y.H., Li Y.C., Liu H.F., Wen K., Gong J., Lu Y.A. An integrated gas supply reliability evaluation method of the large-scale and complex natural gas pipeline network based on demand-side analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021; 212: 107651. DOI: 10.1016/j.res.2021.107651
13. Popov G., Bolobov V., Zhuikov I., Zlotin V. Development of the kinetic equation of the groove corrosion process for predicting the residual life of oil-field pipelines. *Energies*. 2023, 16 (20): 7067.
14. Gong C., Frangopol D.M. Time-variant hull girder reliability considering spatial dependence of corrosion growth, geometric and material properties. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020; 193: 106612.
15. Hassani S., Leblanc L., Nemeth A. Towards an acceptable pipeline integrity target reliability. In: *Proc. 11th Int. Pipeline Conference, American Society of Mechanical Engineers*, 2016.
16. Zimmerman T., Nessim M., McLamb M., Rothwell B., Zhou J., Glover A. Target reliability levels for onshore gas pipelines. In: *Proc. 4th Int. Pipeline Conference*. Calgary, Alta, 2002. Pp. 845–854.
17. Zhang J., Zhang Z., Yu Z., Wu W., Chen Y. Building a target reliability adaptive to China onshore natural gas pipeline. In: *Proc. 10th Int. Pipeline Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2014.
18. Lee J.-H., Kim J.-H., Young-Do J., Hyun K.L. Application of target reliability levels for maintenance of domestic natural gas pipelines. *Journal of The Korean Institute of Gas*. 2018; 22 (3): 1–6.
19. Lee J.-H., Young-Do J., Moon J.-S. A Study on establishing target reliability levels for flammable gas transmission pipelines. *Journal of the Korean Institute of Gas*. 2018; 22 (6), 52–58.

20. Gong C., Frangopol D.M., Cheng M. Risk-based life-cycle optimal dry-docking inspection of corroding ship hull tankers. *Engineering Structures*. 2019; 195, 559–567.
21. Nessim M., Zhou W., Zhou J., Rothwell B., McLamb M. Target reliability levels for design and assessment of onshore natural gas pipelines. In: *Proc. 5th Biennial Int. Pipeline Conference: Compression and Pump Technologies; Corrosion; Design and Construction; Environmental Issues; GIS/Database Development; Innovative Projects and Emerging Issues*. American Society of Mechanical Engineers, Calgary, Alberta, Canada, 2004. Pp. 2501–2512.
22. Kurason O.A. Substantiation of methods of improving safety of pipeline gas transportation. *E3S Web of Conferences: Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*. Vol. 266, Saint-Petersburg, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202126601012. EDN: VJQECF

#### Сведения об авторах

Курасов Олег Александрович, аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, oak18@tpu.ru

Бурков Пётр Владимирович, докт. техн. наук, ст. научный сотрудник, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, burkovpv@mail.ru

#### Authors Details

Oleg A. Kurason, Research Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, oak18@tpu.ru

Petr V. Burkov, DSc, Professor, Senior Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, burkovpv@tpu.ru

#### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Authors contributions

The authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.02.2024  
Одобрена после рецензирования 21.02.2024  
Принята к публикации 01.03.2024

Submitted for publication 11.02.2024  
Approved after review 21.02.2024  
Accepted for publication 01.03.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 2. С. 93–103.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (2): 93–103.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 622.692.4: 539.43

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-93-103

EDN: EVYRTU

# СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ КОНКУРИРУЮЩИХ РИСКОВ ОТКАЗА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Олег Александрович Курасов<sup>1</sup>, Петр Владимирович Бурков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский

Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия

**Аннотация.** *Актуальность.* Важность вопроса применения статистических методов для оценки конкурирующих рисков на участках наземной части газопроводов для принятия решений в области обеспечения надежности и безопасности, а также планирования обслуживания и ремонтных работ не вызывает сомнений.

*Целью* исследования является численное применение методики непараметрического прогнозирования для оценки конкурирующих рисков отказа сложных технических систем.

*Методы исследования.* Приведены два статистических подхода к решению проблемы различных нарушений целостности. В первом используется непараметрическое прогнозирование. Основное внимание уделяется возможному разрыву исследуемого участка трубопровода из-за конкретной угрозы целостности на фоне множества альтернативных угроз (конкурирующих рисков). Второй метод содержит анализ, учитывающий всю сеть газопроводов. Основное внимание уделяется изучению инцидентов с разрывами, что позволяет получить реалистичные данные о надежности полного жизненного цикла усредненного участка трубопровода в конкретном регионе исследования.

*Результаты.* Описано численное применение методики непараметрического прогнозирования для конкурирующих рисков. На основании информации базы данных об отказах выведены нижняя и верхняя вероятности (границы), а также функции живучести для различных конкурирующих причин отказа для будущего участка наземной части газопровода, который выйдет из строя в результате разрыва.

**Ключевые слова:** непараметрическое прогнозирование, надежность, квантильная регрессия, риск, трубопровод, живучесть

**Для цитирования:** Курасов О.А., Бурков П.В. Системный анализ конкурирующих рисков отказа технических систем на основе непараметрического прогнозирования // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 93–103. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-93-103. EDN: EVYRTU

## ORIGINAL ARTICLE

**COMPETING RISKS ANALYSIS OF ENGINEERING SYSTEM FAILURE BASED ON NONPARAMETRIC PREDICTION****Oleg A. Kurasov<sup>1</sup>, Petr V. Burkov<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*<sup>2</sup>*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

**Abstract. Purpose:** The aim of this work is to analyze competing risks of engineering system failure using nonparametric prediction.

**Methodology:** Two statistical methods are used to tackle the problem of the pipeline integrity. Nonparametric prediction is applied in the first one. The main attention is paid to the possible failure of the pipeline section due to a specific threat in terms of competing risks. The second method contains the analysis of the entire pipeline system. The focus is on rupture incidents, that provides the real data on the lifecycle of the pipeline section.

**Research findings:** Nonparametric prediction is used to analyze competing risks of the pipeline failure. The lower and upper probability boundaries and survivability functions and competing risks of the pipeline section failure are introduced for a future ground section of the pipeline, which can be failed as a result of rupture.

**Keywords:** non-parametric forecasting, reliability, quantile regression, risk, pipeline

**For citation:** Kurasov O.A., Burkov P.V. Competing risks analysis of engineering system failure based on nonparametric prediction. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 93–103. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-93-103. EDN: EVYRTU

**Введение**

При статистическом анализе отказов трубопроводы обычно рассматриваются как ремонтпригодные системы.

После выхода системы из строя преобладает метод восстановления ее работоспособности путем ремонта или замены отдельных компонентов, а не полной замены всей системы. Понятие «соответствующая интенсивность отказов» относится к совокупности отказов, происходящих за определенный промежуток времени, а не является производным от единого распределения времени до отказа. В настоящей статье рассматриваются время наработки на отказ для газотранспортных систем и подход, основанный на использовании невосстанавливаемых технических систем. Особенностью базы данных Управления по безопасности трубопроводов и опасным материалам (PHMSA) является предоставление доступа к исходным данным, включая даты прокладки и монтажа трубопроводов, связанных с зарегистрированными инцидентами. Поэтому с помощью логических рассуждений можно сделать выводы о продолжительности периода, предшествовавшего разрушению трубопровода.

Предполагается, что разорванные трубы являются невосстанавливаемыми сегментами, функционирующими в рамках восстанавливаемой системы, т. е. всей трубопроводной сети. Это предположение считается реалистичным, т. к. после разрыва такой участок трубы удаляется и заменяется новым, с учетом, что разрыв, как правило, оказывает негативное воздействие. Даже если участок трубы был отремонтирован или восстановлен до первоначального состояния

перед разрывом в рамках плана технического обслуживания и ремонта, при разрыве он становится нефункциональным. Другими словами, с точки зрения разрыва срок службы участка трубы будет случайной величиной, определяемой временем до отказа. Предполагается, что для группы одинаковых сегментов труб время их «жизни» является независимым и одинаково распределенным. Таким образом, можно исследовать их надежность от разрыва для целого ряда возможных и конкурирующих причин отказов.

В статье представлены два статистических подхода, направленных на решение проблемы различных нарушений целостности. Обе методики применяют подход к невозстанавливаемым системам и получают свои значения на основе реальных инцидентов, зафиксированных в базе данных PHMSA. В первой методике используется непараметрическое прогнозирование (НПП) – статистический подход, основанный на анализе живучести и теории надежности. Процесс количественной оценки интервальных вероятностей, которые также называются неточными вероятностями, предполагает использование верхних и нижних границ, как это предусмотрено в НПП. Основное внимание уделяется возможному разрыву исследуемого участка трубопровода из-за конкретной угрозы целостности на фоне множества альтернативных угроз (конкурирующих рисков). Вторая статистическая методика предполагает применение параметрической гибридной эмпирической модели опасности в сочетании с нелинейной квантильной регрессией, представляющей собой надежный метод обработки данных, для проведения анализа надежности и ее прогнозирования. Она позволяет сделать выводы о надежности полного жизненного цикла усредненного участка трубопровода в конкретном регионе исследования.

#### Постановка задачи, методы исследования

Статистическая модель НПП эффективно работает с конкурирующими рисками и позволяет получить представление о надежности исследуемой совокупности трубопроводов при недостатке информации, а также при сосуществовании нескольких причин отказов [1, 2]. НПП, предполагающее независимость причин отказа, позволяет применять статистические методы для прогнозирования будущих наблюдений на основе имеющихся данных. Методология, используемая в данном исследовании, основана на постулате Хилла [3] и представляет собой четко определенную условную вероятность для наблюдаемой будущей случайной величины. Вероятность зависит от математической концепции взаимозаменяемости и наблюдаемых значений связанных случайных величин. Кроме того, она генерирует интервальные вероятности, которые в научной литературе признаются неточными вероятностями. Это говорит о том, что для оценки неопределенности необходимо использовать диапазон вероятностей от меньших значений к большим (нижнюю и верхнюю границы). Таким образом, функции живучести также оцениваются в определенных границах. Метод НПП позволяет делать выводы о фактическом времени наработки на отказ отдельного элемента трубопровода, который будет заменен в будущем, а также работать с правым цензурированием, обеспечивая выводы по каждой отдельной причине отказа или конкурирующему риску. Применение НПП адаптировано к специфике анализа надежности тех-

нических систем (трубопроводов), и на основе исторических данных об отказах делаются реальные выводы для полного жизненного цикла трубопроводной системы.

Основной задачей первой статистической методики является определение достоверной вероятности разрыва, классифицированной по конкретным причинам. Для изучения массива данных об инцидентах с разрывами с применением НПП используется теория конкурирующих рисков. Сбор такой информации имеет большое значение для своевременного получения полного представления о рисках и их последствиях. В данной работе демонстрируется применение НПП к базе данных PHMSA для оценки функции живучести при разрывах наземных газопроводов. При этом рассматривается только совокупность разрывов, а не вся трубопроводная сеть. В результате делаются выводы о будущем участке, на котором произойдет разрыв из-за конкретной причины отказа, и получаются нижняя и верхняя вероятности (границы) этого события. Полученные функции живучести представляют собой дополнительные вероятности разрыва трубопровода для этого будущего участка в данный момент времени.

В случаях, когда участок трубопровода подвержен разрыву по нескольким вероятным причинам, а не по одной, концепция конкурирующих рисков является надежным методом расчета вероятности в реальных ситуациях [4]. Декомпозиция вероятности разрыва участка трубы позволяет операторам получить более полное представление о рисках, связанных с различными сценариями отказа. Эти решения могут касаться выбора плана технического обслуживания, оптимального распределения ресурсов и понимания долгосрочных последствий механизмов отказа.

В настоящей статье проведен обзор НПП для конкурирующих рисков.  $A(x)$  является байесовской, поверенной процедурой доверия/толерантности [5]. Предложенная концепция обладает такими характеристиками, как простота, согласованность и правдоподобность, что соответствует признанным методологиям статистического анализа. Рассмотрим непрерывные и взаимозаменяемые случайные величины  $Y_{B1}, \dots, Y_{Bx}, Y_{Bx+1}$ . Величины  $Y_{B1}, \dots, Y_{Bx}$  предполагаются наблюдаемыми и обозначаются как упорядоченные значения  $-\infty < y_{B1} < \dots < y_{Bx} < \infty$  ( $y_{B0} = -\infty$ ). Вероятно, что среди наблюдаемых значений нет связей, а если они есть, то связанные наблюдения различаются на тривиальные величины.

Для  $Y_{Bx+1}$ , которая представляет собой будущую наблюдаемую случайную величину, обусловленную наблюдениями  $x$ ,  $A(x)$  является:

$$\begin{aligned} P(Y_{B_{x+1}} \in (y_{\omega-1}, y_{\omega})) &= \frac{1}{x+1}, \quad \omega = 1, \dots, x; \\ P(Y_{B_{x+1}} \in (Y_{B_x}, \infty)) &= \frac{1}{x+1}. \end{aligned} \quad (1)$$

Статистический метод НПП основан на предположении Хилла  $A(x)$ , которое представляет собой идею о взаимозаменяемости постобработки данных [1, 2]. Выводы, сделанные на основе переменной  $A(x)$ , обладающей как прогностическими, так и непараметрическими свойствами, дают значительные преимущества в условиях недостатка или нежелательности дополнительной информации. Это особенно актуально при анализе последствий дополни-

тельных допущений, лежащих в основе различных статистических подходов. Точная калибровка этих выкладок [6] дает веские основания для их применения в контексте частотной статистики. С другой стороны, в теории интервальной оценки вероятности вместо точных вероятностей интересующих событий используются границы вероятностей, обладающих свойствами устойчивой согласованности, о чем говорит  $A(x)$  [7, 8].

В работе [9] авторы предложили преобразовать переменную  $A(x)$  в переменную правого цензурирования  $A(x)$  или  $rc$ -  $A(x)$  для учета его влияния на время события, когда имеется лишь ограниченная информация, указывающая на то, что событие еще не произошло. В  $rc$ -  $A(x)$  используется дополнительное предположение о том, что остаточное время жизни отдельного сегмента трубопровода, прошедшего правое цензурирование, можно заменить остаточным сроком службы всех других элементов, которые еще не вышли из строя или не подверглись цензуре на момент цензурирования. Для получения подходящей формы  $rc$ -  $A(x)$  для НПП о конкурирующих рисках необходимо использовать обозначение, которое определяет вероятностную функцию массы, приписываемую интервалам, не накладывая дополнительных ограничений на распределение внутри этих интервалов. Далее представлена  $M$ -функция, которая служит обозначением для частичной спецификации вероятностных распределений.

Значение  $M$ -функции для  $Y_B$  на интервале  $(a_B, b_B)$ , обозначаемое как  $M_{Y_B}(a_B, b_B)$ , представляет собой массу вероятности, приписываемую значению  $Y_B$  внутри этого интервала. Поскольку все значения  $M$ -функции для  $Y_B$  на всех интервалах должны в сумме равняться единице, то каждое значение  $M$ -функции должно находиться в интервале  $[0, 1]$ , и  $A(x)$  можно выразить как  $M_{Y_B x+1}(x_\omega, x_{\omega+1}) = 1/(x+1)$ , для  $\omega = 0, \dots, x - 1$  и  $M_{Y_B x+1}(y_{Bx}, \infty) = 1/(x+1)$ . Предположение «правое цензурирование  $A(x)$ » или  $rc$ -  $A(x)$  частично задает распределение вероятностей на основе НПП для неотрицательной случайной величины  $X_{x+1}$ , исходя из  $u_B$  времени событий и  $v_B$  времени правого цензурирования. В частности, оно частично задается ( $\omega = 0, \dots, u_B$ ; и  $k_B = 1, \dots, l_{B\omega}$ , с  $t_0 = 0$  и  $t_{u_B+1} = \infty$ ):

$$M_{X_{x+1}}(t_\omega, t_{\omega+1}) = \frac{1}{x+1} \prod \{r_B : c_{r_B} < t_\omega\} \frac{\tilde{x}_{c_{r_B}} + 1}{\tilde{x}_{c_{r_B}}}; \quad (2)$$

$$M_{X_{x+1}}(c_{k_B}^\omega, t_{\omega+1}) = \frac{1}{(x+1)\tilde{x}_{c_{k_B}^\omega}} \prod \{r_B : c_{r_B} < c_{k_B}^\omega\} \frac{\tilde{x}_{c_{r_B}} + 1}{\tilde{x}_{c_{r_B}}}. \quad (3)$$

Это неявно предполагает независимое (неинформативное) цензурирование как предположение постобработки данных, связанное с возможностью обмена, для всех единиц, о которых известно, что они подвержены риску в любой момент времени  $t$ . Если цензурирования нет, то  $rc$ -  $A(x)$  идентично  $A(x)$ . Термины  $\tilde{x}_{c_{r_B}}$  и  $\tilde{x}_{c_{k_B}^\omega}$  описывают количество единиц в наборе рисков до

момента времени  $c_{r_B}$  и  $c_{k_B}^\omega$  соответственно. В данной статье используется определение  $\tilde{x}_0 = x + 1$ . Суммирование всех значений  $M$ -функции, присвоенных интервалам этой формы (которые имеют положительные значения

$M$ -функции и в сумме равны единице по всем этим интервалам) и имеющих тот же  $x_{\omega+1}$ , что и правая конечная точка, дает следующую вероятность:

$$P(X_{x+1} \in (x_{\omega}, x_{\omega+1})) = \frac{1}{x+1} \prod \{r_B : c_{r_B} < t_{\omega}\} \frac{\tilde{x}_{c_{r_B}} + 1}{\tilde{x}_{c_{r_B}}}, \quad (4)$$

где  $x_{\omega}, x_{\omega+1}$  – два последовательных времени отказа.

Ниже будет описана альтернативная методика статистического анализа, которая может быть использована для оценки общей надежности конкретного участка трубопровода в рамках более крупной трубопроводной сети. Трубы классифицируются как неремонтируемые сегменты, функционирующие внутри ремонтируемой системы, охватывающей всю трубопроводную сеть.

Для иллюстрации предлагаемой модели применяются данные базы PHMSA за период 2002–2022 гг. по инцидентам с разрывами наземных газотранспортных трубопроводов. Данные по инцидентам за период 2002–2022 гг. считаются достаточно репрезентативными для текущего состояния и применения ремонтных работ на наземных газопроводах. База данных PHMSA включает в себя значительное количество наземных газопроводов, что обуславливает разнообразие их характеристик, таких как различие материалов, состояние грунта и несоответствие диаметров. Обнаруживается также несоответствие между базой данных, содержащей инциденты, и базой данных, включенной в годовой отчет. Последняя содержит информацию о трубопроводах и их километраже. Несоответствие данных в большой степени подрывает доверие к статистическому анализу.

В работах [10, 11] была проанализирована база данных PHMSA и проведена оценка соответствующих показателей отказов для получения базовых вероятностей отказов и проведения общесистемных оценок риска трубопроводов. Рассматривались причины и режимы отказов при инцидентах на трубопроводах [12, 13]. Формат данных об инцидентах до 2010 г. отличается от последующего, поэтому сведения за эти два периода пришлось сгруппировать. Аналогичная стратегия группировки (агрегирования) применяется и в данном случае. Для уменьшения неопределенности, присущей статистическому анализу базы данных PHMSA, используется гибридная эмпирическая модель опасности в сочетании с нелинейной квантильной регрессией – надежным методом обработки данных. Предполагается, что предложенная комбинированная модель позволяет получить достоверный диапазон ожидаемых показателей надежности рассматриваемой инфраструктуры газопроводов для полного срока службы в 100 лет, в отличие от подхода интенсивности отказов (ROCOF), который дает возможность получить среднегодовые показатели отказов только для исследуемого периода времени, т. е. 20 лет для периода 2002–2022 гг.

### Обсуждение результатов исследований

Считается, что газопроводы, как и многие другие типичные крупномасштабные инженерные сооружения (технические системы), подчиняются некоторым схожим закономерностям в отношении интенсивности отказов или опасности. Одной из наиболее часто встречающихся в литературе моделей опасности для крупных инженерных сооружений является модель U-образного распределения [14, 15]. В данном исследовании она принята для всего

жизненного цикла газопровода, состоящего из трех фаз (рис. 1). Фаза 1 представляет собой фазу зарождающихся отказов или «ранних отказов» (мгновенный выход из строя), интенсивность которых уменьшается со временем. Фаза 2 представляет собой случайные отказы, и вероятность отказа постоянна. Фаза 3 называется фазой износа, или деградации, когда количество отказов и, соответственно, интенсивность отказов со временем возрастают. Для описания этих смешанных распределений можно успешно применять множество моделей. В данном исследовании для фазы 2 используется экспоненциальное распределение с постоянной интенсивностью отказов  $\lambda_B$ , а для фазы 3 – смешанное экспоненциальное распределение и распределение Вейбулла, уравнения (5) и (6).

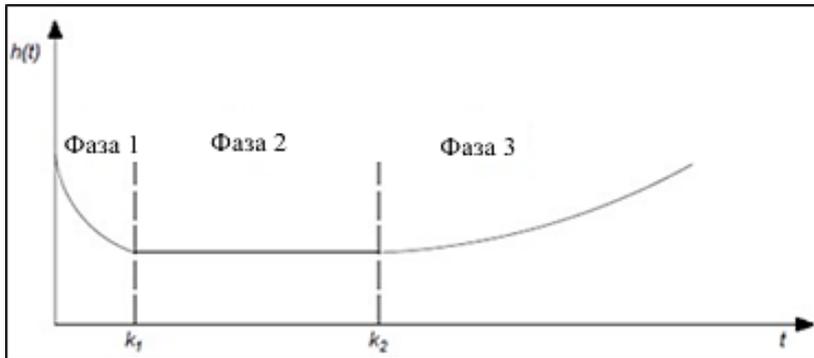


Рис. 1. U-образное распределение [13]  
 Fig. 1. U-shaped distribution [13]

В современных условиях фазой 1 для газотранспортных трубопроводов можно пренебречь. Широко распространено мнение, что возникновение катастроф на начальных этапах эксплуатации может быть связано в основном с недостатками строительных и/или производственных процессов, человеческим фактором и случайными причинами. Однако следует отметить, что газопроводы часто являются крупномасштабными инфраструктурными объектами с длительным сроком эксплуатации. В свете этого продолжительность и масштабы начального этапа следует считать незначительными. В результате рассматриваемая картина опасностей включает только фазы 2 и 3 (рис. 2).

$$h(t) = \lambda_B \text{ для } k_1 \leq t \leq k_2; \quad (5)$$

$$h(t) = \lambda_B + \left( \frac{\beta_2}{\alpha_2} \right) \left( \frac{t - k_2}{\alpha_2} \right)^{\beta_2 - 1} \text{ для } t \geq k_2, \alpha_2 > 0, \beta_2 > 1. \quad (6)$$

В контексте рассматриваемого трубопровода переменная  $t$  обозначает возраст трубопровода, а  $h(t)$  – функцию опасности. Параметр  $\lambda_B$  используется для обозначения постоянной интенсивности отказов, а  $\alpha_2$  и  $\beta_2$  – для обозначения параметров масштаба и формы распределения Вейбулла соответственно. Параметры  $k_1$  и  $k_2$  представляют собой начальную и конечную стадии фазы 2 соответственно.

После того как функции опасности получены, на их основе можно вывести функции надежности. Уравнения (7) и (8) дают непрерывные кривые надежности, соответствующие непрерывным кривым опасности. Функции надежности, соответствующие уравнениям (5) и (6), таковы:

$$R_{s_1}(t) = e^{-\lambda B t} \text{ для } k_1 \leq t \leq k_2; \quad (7)$$

$$R_{s_2}(t) = e^{-\lambda B t} + e^{-\left(\frac{t-k_2}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}} \text{ для } t \geq k_2, \alpha_2 > 0, \beta_2 > 1. \quad (8)$$

Уравнения (5) – (8) влекут за собой предположение, что случайные отказы происходят как на этапе 2, так и на этапе 3, но на этапе 3 происходит ускоряющаяся деградация структуры с течением времени, и это описывается распределением Вейбулла.

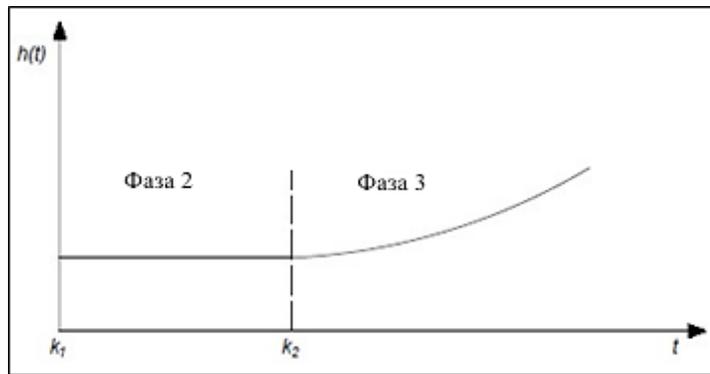


Рис. 2. U-образное распределение для газопроводов [13]

Fig. 2. U-shaped distribution for pipelines [13]

В пределе малых временных интервалов  $\Delta t$  дискретный коэффициент опасности измеряет частоту отказов в следующий момент времени для тех слоев населения, которые (при условии) дожили до момента времени  $t$ :

$$h_i = \frac{N_s(t_{i-1}) - N_s(t_i)}{\Delta t \cdot N_s(t_{i-1})}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, \quad (9)$$

где  $N_s(t_{i-1})$  и  $N_s(t_i)$  – количество функциональных слоев населения в моменты времени  $t_{i-1}$  и  $t_i$  соответственно.

Уравнение (9) также называется интенсивностью критических отказов (силой смертности) и является свойством распределения времени до отказа [16]. Данный подход считается адекватным для получения функции опасности отказов газопроводов, поскольку они могут быть разделены на сегменты с одинаковыми или близкими характеристиками. Кроме того, этот подход позволяет эффективно работать с дефицитом данных с левой или правой цензурой, оценивая дискретную опасность только в те моменты, когда данные об отказах доступны и имеются в распоряжении.

Принятый подход к оценке параметров состоит из двух частей. Первая часть представляет собой эвристический метод и касается параметров  $\lambda_B$  и  $k_2$ .

В частности, параметр  $k_2$  может быть определен по дискретной гистограмме опасности, которая строится на основе уравнения (9). Считается, что параметр  $k_2$  легко определяется при наличии полных и непротиворечивых данных, однако в силу статистических неопределенностей и флуктуаций это не всегда так и обычно требует экспертной оценки. Кроме того,  $\lambda_B$  является постоянной экспоненциального распределения отказов и представляет собой фазу случайного отказа. Значение  $\lambda_B$  может быть получено как среднее значение дискретных значений опасности, относящихся к этой фазе, т. е. фазе 2. Оно может быть определено как

$$\lambda_B = \frac{1}{N_k} \sum_{1 < i \leq N_k} h_i, \quad (10)$$

где  $k = k_2 - k_1$ .

Наконец, параметры  $\alpha_{FT}$  и  $\beta_{FT}$  необходимо оценить по фазе износа, т. е. по фазе 3, с помощью робастного графического метода оценивания параметров.

### Заключение

Методология, представленная в статье, использует подход НПП для вывода логических заключений из набора данных о сроках службы поврежденных трубопроводов. Подход, описанный в настоящем исследовании, был применен к набору данных, предоставленных PHMSA. Набор данных состоял из инцидентов с разрывами, произошедших на наземных газотранспортных трубопроводах в период с 2002 по 2022 г. Анализ эпизодов разрывов проводился с использованием подхода НПП. Время до разрыва сегментов трубопровода определялось расчетным путем.

На основе анализа исторических данных об отказах было показано, что применение НПП дает преимущества при прогнозировании будущих случаев разрывов сегментов трубопровода, вызванных конкретной причиной отказа. Результат достигается за счет получения вероятностных оценок и функций живучести, которые могут быть неточными, но, тем не менее, информативными для каждого случая.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Coolen F.P.A, Coolen-Schrijner P., Yan K.J. Nonparametric predictive inference in reliability // Reliability Engineering & System Safety. 2002. V. 78.2. P. 185–193. DOI: 10.1016/S0951-8320(02)00162-X
2. Maturi Tahani. Nonparametric predictive inference for multiple comparisons : Diss. UK. Durham University, 2010. 166 p.
3. Hill B.M. Parametric models for  $A_N$ : splitting processes and mixtures // Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological). 1993. V. 55. I. 2. P. 423–433.
4. Hinchliffe S.R., Lambert P.C. Flexible parametric modelling of cause-specific hazards to estimate cumulative incidence functions // BMC medical research methodology. 2013. V. 13 (1). P. 1–13.
5. Hill B.M. De Finetti's Theorem, Induction, and  $A(n)$  or Bayesian nonparametric predictive inference (with discussion) // Bayesian Statistics. 1988. № 3. P. 211–241.
6. Lawless J.F., Fredette M. Frequentist prediction intervals and predictive distributions // Biometrika. 2005. V. 92. P. 529–542. DOI: 10.1093/biomet/92.3.529
7. Walley P. Statistical reasoning with imprecise probabilities. London : Chapman and Hall, 1991. 706 p.

8. Weichselberger K. The theory of interval-probability as a unifying concept for uncertainty // *International Journal of Approximate Reasoning*. 2000. V. 24 (2). P. 49–170.
9. Coolen F.P.A., Yan K.J. Nonparametric predictive inference with right-censored data // *Journal of Statistical Planning and Inference*. 2004. V. 126.1. P. 25–54.
10. Kiefner J.F., Mesloh R.E., Kiefner B.A. Analysis of DOT reportable incidents for gas transmission and gathering system pipelines, 1985 through 1997 // *Pipeline Research Council International : catalogue*. 2001. L51830E.
11. Lam C., Zhou W. Statistical analyses of incidents on onshore gas transmission pipelines based on PHMSA database // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2016. V. 145. P. 29–40.
12. Hilgenstock Achim, et al. Using or creating incident databases for natural gas transmission pipelines // *2nd Pipeline Technology Conference 2007*. EITEP Institute, 2011.
13. Popov G., Bolobov V., Zhuikov I., Zlotin V. Development of the Kinetic Equation of the Groove Corrosion Process for Predicting the Residual Life of Oil-Field Pipelines // *Energies*. 2023. V.16 (20). P. 7067.
14. Sun Yong, Colin Fidge, Lin Ma. Reliability prediction of long-lived linear assets with incomplete failure data // *2011 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering*. IEEE, 2011. P. 143–147.
15. Shafiee M., Finkelstein M., Chukova S. Burn-in and imperfect preventive maintenance strategies for warranted products // *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part O: journal of Risk and reliability*. 2011. V. 225.2. P. 211–218. DOI: 10.1177/1748006X11398584
16. Charles E. Ebeling. An introduction to reliability and maintainability engineering. Waveland Press, 2019. 658 p.

## REFERENCES

1. Coolen F.P.A., Coolen-Schrijner P., Yan K.J. Nonparametric predictive inference in reliability. *Reliability Engineering & System Safety*. 2002; 78.2: 185–193. DOI: 10.1016/S0951-8320(02)00162-X
2. Maturi Tahani. Nonparametric predictive inference for multiple comparisons. DSc Thesis. Durham University, 2010. 166 p.
3. Hill B.M. Parametric models for AN: Splitting processes and mixtures. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*. 1993; 55 (2): 423–433.
4. Hinchliffe S.R., Lambert P.C. Flexible parametric modelling of cause-specific hazards to estimate cumulative incidence functions. *BMC Medical Research Methodology*. 2013; 13 (1): 1–13.
5. Hill B.M. De Finetti's theorem, induction, and A(n) or Bayesian nonparametric predictive inference (with discussion). *Bayesian Statistics*. 1988; (3). Pp. 211–241.
6. Lawless J.F., Fredette M. Frequentist prediction intervals and predictive distributions. *Biometrika*. 2005; 92: 529–542. DOI: 10.1093/biomet/92.3.529
7. Walley P. Statistical reasoning with imprecise probabilities. London: Chapman and Hall, 1991. 706 p.
8. Weichselberger K. The theory of interval-probability as a unifying concept for uncertainty. *International Journal of Approximate Reasoning*. 2000; 24 (2): 49–170.
9. Coolen F.P.A., Yan K.J. Nonparametric predictive inference with right-censored data. *Journal of Statistical Planning and Inference*. 2004; 126.1: 25–54.
10. Kiefner J.F., Mesloh R.E., Kiefner B.A. Analysis of DOT reportable incidents for gas transmission and gathering system pipelines, 1985 through 1997. In: *Pipeline Research Council International Catalogue*. 2001. L51830E.
11. Lam C., Zhou W. Statistical analyses of incidents on onshore gas transmission pipelines based on PHMSA database. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2016; 145. P. 29–40.
12. Hilgenstock Achim, et al. Using or creating incident databases for natural gas transmission pipelines. In: *Proc. 2nd Pipeline Technology Conference 2007*. EITEP Institute, 2011.
13. Popov G., Bolobov V., Zhuikov I., Zlotin V. Development of the kinetic equation of the groove corrosion process for predicting the residual life of oil-field pipeline. *Energies*. 2023;16 (20): 7067.
14. Sun Yong, Colin Fidge, Lin Ma. Reliability prediction of long-lived linear assets with incomplete failure data. In: *Proc. 2011th Int. Conf. on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering*. IEEE, 2011. Pp. 143–147.

15. *Shafiee M., Finkelstein M., Chukova S.* Burn-in and imperfect preventive maintenance strategies for warranted products. *Journal of Risk and Reliability*. 2011; 225.2: 211–218. DOI: 10.1177/1748006X11398584
16. *Charles E. Ebeling.* An introduction to reliability and maintainability engineering. Waveland Press, 2019. 658 p.

#### **Сведения об авторах**

*Курасов Олег Александрович*, аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, oak18@tpu.ru

*Бурков Пётр Владимирович*, докт. техн. наук, ст. научный сотрудник, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, burkovpv@mail.ru

#### **Authors Details**

*Oleg A. Kurasov*, Research Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, oak18@tpu.ru

*Petr V. Burkov*, DSc, Professor, Senior Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, burkovpv@tpu.ru

#### **Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Authors contributions**

The authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.11.2023  
Одобрена после рецензирования 28.11.2023  
Принята к публикации 01.03.2024

Submitted for publication 12.11.2023  
Approved after review 28.11.2023  
Accepted for publication 01.03.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 2. С. 104–112.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (2): 104–112.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-104-112

EDN: HOISNK

## АНАЛИЗ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО БЕЗРИГЕЛЬНОГО КАРКАСА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗДАНИЯ НА РАЗЛИЧНОЙ СТАДИИ ЕГО РАБОТЫ

**Иван Иванович Подшивалов**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия*

**Аннотация.** Объектом исследования являются несущая способность и устойчивость железобетонного безригельного каркаса в условиях линейной и физически нелинейной работы его материалов при статическом нагружении.

**Цель работы** состоит в анализе прочности безригельного железобетонного каркаса с применением коэффициента конструктивной прочности в линейном расчете и коэффициента использования по несущей способности, определенных по теории расчета по предельной поверхности элементов, а также линейной и физически нелинейной устойчивости с применением концепции предельной отпорности системы.

Расчетное обоснование несущей способности и устойчивости безригельного железобетонного каркаса здания на различной стадии работы его материалов выполнено в программном комплексе Ing+2021 MicroFe с разработкой расчетной конечно-элементной пространственной модели.

**Результаты.** Получены результаты, когда при обеспечении конструктивной прочности и несущей способности безригельного железобетонного каркаса линейная и физически нелинейная устойчивость обеспечиваются с достаточным запасом, в результате чего выполняются условия прочности и устойчивости безригельного железобетонного каркаса экспериментального здания по первой группе предельных состояний.

**Ключевые слова:** железобетонный каркас, прочность, несущая способность, устойчивость, линейная и нелинейная работа, расчетная модель

**Для цитирования:** Подшивалов И.И. Анализ несущей способности и устойчивости железобетонного безригельного каркаса экспериментального здания на различной стадии его работы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 104–112. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-104-112. EDN: HOISNK

ORIGINAL ARTICLE

## BEARING CAPACITY AND STABILITY OF REINFORCED CONCRETE COMPOSITE FRAME WITHOUT COLLAR BEAMS AT DIFFERENT OPERATION STAGES

Ivan I. Podshivalov

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

**Abstract.** The paper studies the load-bearing capacity and stability of reinforced concrete composite frame without collar beams during linear and physically nonlinear operation of its materials under static loading.

**Purpose:** The strength analysis of a reinforced concrete frame without collar beams using the coefficient of structural strength in the linear calculation and use factor by bearing capacity determined by the limit surface of elements, as well as linear and physically nonlinear stability based on the limit repulsion of the system.

**Methodology:** The computational substantiation of the bearing capacity and stability of the reinforced concrete frame at different stages of materials performance, is carried out in the Ing+2021 MicroFe program with the proposed finite element spatial model.

**Research findings:** The structural strength and bearing capacity are calculated for reinforced concrete composite frame without collar beams during linear and physically nonlinear operation of its materials under static loading.

**Keywords:** reinforced concrete frame, strength, bearing capacity, stability, linear and nonlinear performance, calculation model

**For citation:** Podshivalov I.I. Bearing capacity and stability of reinforced concrete composite frame without collar beams at different operation stages. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 104–112. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-104-112. EDN: HOISNK

При анализе статической работы экспериментального здания возникает необходимость в оценке напряженно-деформированного состояния железобетонного безригельного каркаса на всех стадиях работы арматуры и бетона его стержневых конструктивных элементов – начиная с линейного расчета и заканчивая нелинейным расчетом с использованием теории предельных поверхностей. Расчет железобетонного каркаса на устойчивость, выполняемый, как правило, в линейной постановке, является также обязательным. В настоящее время для более полного анализа выполнения условий по первой группе предельных состояний, помимо вышеуказанных расчетов, необходимо становится выполнение физически нелинейного расчета железобетонного каркаса на устойчивость по концепции предельной отпорности с заданием работы бетона и арматуры по трехлинейной и по билинейной диаграммам деформирования соответственно.

Основные преимущества монолитного и сборного домостроения наиболее эффективно используются в сборно-монолитном исполнении каркаса [1]. Монолитные конструкции позволяют возводить здания любой формы. Основным преимуществом сборных конструкций является возможность устройства

стен и перекрытий заводского изготовления. В сборно-монолитном домостроении наблюдается, с одной стороны, завышенная оценка конструктивных решений [2], а с другой – недостаточная экспериментальная база данных для объективного анализа несущей способности, жесткости и трещиностойкости конструкций [3].

Применение монолитного ребристого перекрытия, по сравнению с плоским перекрытием, позволяет получить конструкцию с более высокой несущей способностью, жесткостью и трещиностойкостью, а также приводит к уменьшению расхода бетона и арматуры [4]. При этом в жилых зданиях из-за малой высоты помещений устройство ригелей нежелательно [5].

Конструктивное решение сборно-монолитного каркаса здания повышенной этажности предложено в работе [6], где пространственная устойчивость обеспечивается арматурным соединением и замоноличиванием стыков сборных панелей-рам, монолитных участков ригелей и дисков сборных плит перекрытий.

Конструкции железобетонного каркаса должны сохранять свои основные функции на протяжении всего периода эксплуатации [7]. Здание следует проектировать таким образом, чтобы в случае разрушения одного из элементов весь объект или его отдельная часть сохраняли работоспособность в течение времени, достаточного для принятия срочных мер [8].

Расчет стержневых железобетонных систем в нелинейной постановке можно выполнить по теории предельных поверхностей по методике, приведенной, например, в работе [9], где по экспериментальным результатам испытания железобетонных колонн в нелинейной деформированной модели построены области прочности нормального сечения «N-M-M» и «N-e-e», получены их огибающие поверхности, разработаны рекомендации по обоснованию прочности при косом внецентренном сжатии.

Благодаря использованию расчетных программ в проектировании стало возможным выполнение расчетов стержневых систем путем непосредственного анализа их равновесия с учетом перемещений от внешних воздействий – расчет по деформированной схеме. При этом появилась возможность проверки общей устойчивости всего сооружения, в отличие от поэлементной проверки устойчивости по нормам проектирования [10].

В концепции расчета конструкций по предельному поведению В.В. Катюшина в рамных конструкциях может возникнуть ситуация, когда сложно определить критерии их предельного состояния и, как следствие, необходимые запасы прочности и устойчивости [11]. Так, изменения общих характеристик элементов, таких как продольная и изгибная жесткость, отпорность, которые могут быть обусловлены локальными пластическими деформациями, влияют на глобальное поведение всей системы, содержащей эти элементы.

По вышеприведенной концепции В.В. Катюшина А.В. Перельмутер понятие предельного состояния дополняет характеристикой поведения системы, которая определяется скоростью изменения реакции системы при изменении внешнего воздействия [12]. В качестве измерителя предлагается использовать уменьшение угла наклона кривой состояния равновесия, которое характеризует потерю отпорности, что может быть применено для оценки близости конструкции к состоянию отказа, которое возникает при нулевой отпорности системы.

В настоящей статье рассматривается экспериментальное пятиэтажное двухподъездное здание с подвалом прямоугольной формы в плане с размерами по крайним осям  $43,34 \times 12,0$  м. Здание запроектировано для строительства в Кемеровской области, его высота составляет 18,65 м.

Конструктивная схема здания представляет собой сборно-монолитный безригельный каркас, который состоит из сборных железобетонных колонн сечением  $300 \times 300$  мм, диагональных вертикальных связей по колоннам сечением  $200 \times 250$  мм и жестких дисков перекрытий толщиной 160 мм, объединяющих колонны и связи в единую пространственную систему. Продольная арматура колонн и связей –  $4\text{Ø}25\text{A}400$ , поперечная арматура –  $\text{Ø}6\text{A}240/200$ . Класс бетона – В25.

По заданной конструктивной схеме здания в программном комплексе Ing+2021 MicroFe была разработана расчетная модель, в которой панели диафрагмы жесткости в подвале и диски перекрытий моделировались конечным элементом типа «плоский прямоугольный элемент оболочки», колонны, связи и сваи моделировались конечным элементом типа «стержень». Все нагрузки статические. Расчетная конечно-элементная модель здания и ее визуализация приведены на рис. 1.

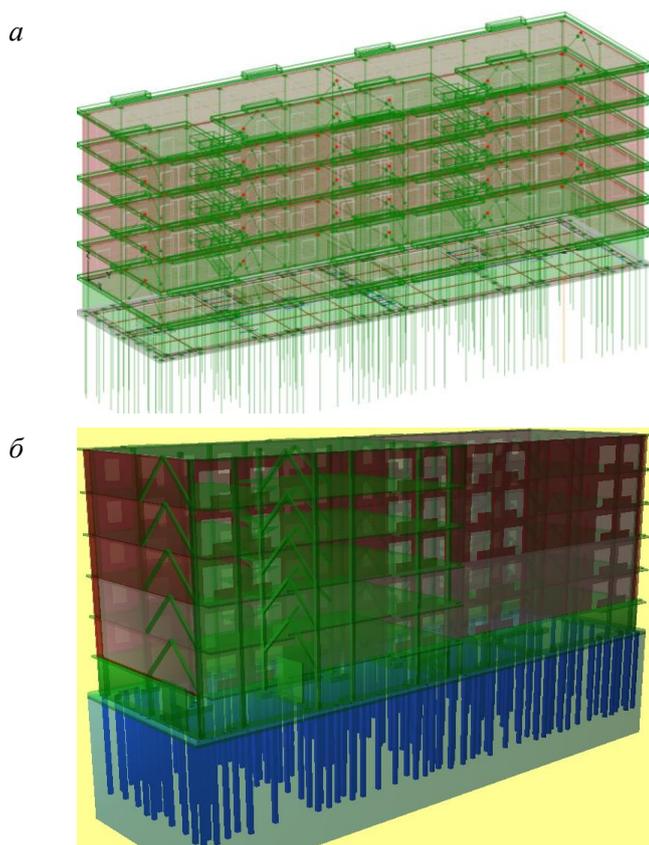


Рис. 1. Расчетная конечно-элементная модель (а) и ее визуализация (б)  
Fig. 1. FEM (a) and model visualization (b)

В расчетной модели были рассмотрены четыре схемы:

- расчетная схема № 1 – линейный расчет железобетонного каркаса на прочность и жесткость;
- расчетная схема № 2 – нелинейный расчет железобетонного каркаса по теории предельных поверхностей конструктивных элементов;
- расчетная схема № 3 – линейный расчет железобетонного каркаса на устойчивость;
- расчетная схема № 4 – физически нелинейный расчет железобетонного каркаса на устойчивость по концепции предельной отпорности с использованием основной формы собственных колебаний с минимальным значением коэффициента использования критической нагрузки. Здесь заданы следующие характеристики бетона по трехлинейной диаграмме деформирования:  $R_{bc} = 14,5$  МПа;  $R_{bt} = 1,05$  МПа;  $E_{ob} = 30$  ГПа;  $\varepsilon_{bo} = 0,0034$ ;  $\varepsilon_{bt} = 0,00024$ ;  $\varepsilon_{b2} = 0,0048$ ;  $\varepsilon_{b2t} = 0,00031$ . Характеристики арматуры по билинейной диаграмме деформирования: предел текучести  $\sigma_t = 355$  МПа; модуль упругости на линейном участке  $E_s = 200$  ГПа.

*Расчетная схема № 1.* Изополя коэффициента использования прочности в колоннах и связях железобетонного каркаса приведены на рис. 2, анализ данных которого показывает, что наибольший уровень нагружения отмечен в колоннах с максимальным значением коэффициента использования сечения  $\max k = 0,909 < 1$ . Отсюда следует, что условие прочности по первой группе предельных состояний для колонн и связей каркаса выполнено.

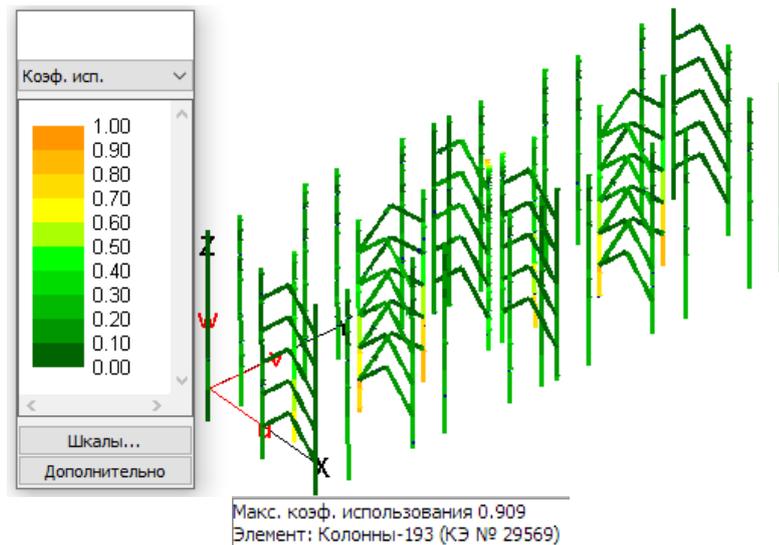


Рис. 2. Изополя коэффициента использования прочности в колоннах и связях железобетонного каркаса в расчетной схеме № 1

Fig. 2. Isofields of strength use factor in columns and connections of reinforced concrete frame in design model 1

*Расчетная схема № 2.* Изополя коэффициента использования по несущей способности, определяемого по предельной поверхности элементов (рис. 3),

демонстрируют, что его наибольшее значение в наиболее нагруженных элементах каркаса – колоннах – составляет  $\max k = 0,842$  и не превышает единицы. Как и в предыдущем случае, несущая способность колонн и связей железобетонного каркаса по первой группе предельных состояний обеспечена.

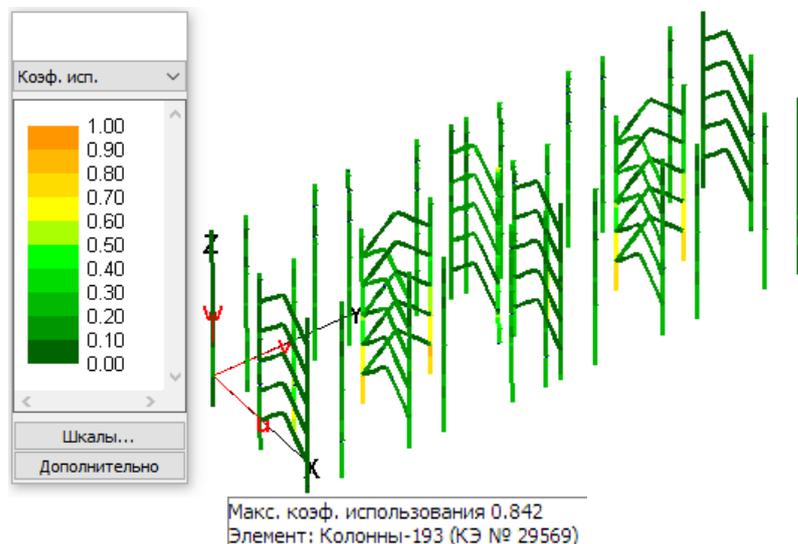


Рис. 3. Изополя коэффициента использования по несущей способности колонн и связей железобетонного каркаса в расчетной схеме № 2

Fig. 3. Isofields of bearing capacity use factor in columns and connections of reinforced concrete frame in design model 2

Следует отметить, что при упругой работе колонн и связей каркаса в расчетной схеме № 1 величина коэффициента использования сечения  $\max k = 0,909$  меньше единицы на 9 %, а в нелинейном расчете колонн и связей по теории предельных поверхностей конструктивных элементов в расчетной схеме № 2 значение коэффициента использования по несущей способности  $\max k = 0,842$  меньше единицы уже на 16 %. Таким образом, учет упругопластической работы материалов колонн и связей показывает фактический запас по несущей способности этих элементов до наступления предельного состояния.

*Расчетная схема № 3.* Деформированная схема основной первой формы собственных колебаний показана на рис. 4. Форма колебаний соответствует изгибной форме. Для этой формы собственных колебаний коэффициент использования критической нагрузки (критический параметр)  $p = 3,80313 > 1$ . Следовательно, условие устойчивости колонн и связей железобетонного каркаса при упругой работе его материалов по первой группе предельных состояний выполнено.

*Расчетная схема № 4.* Деформированная схема основной первой формы собственных колебаний приведена на рис. 5. Форма колебаний также соответствует изгибной форме. Для этой формы собственных колебаний критический параметр  $p = 3,80168$ , который за счет физически нелинейной работы материалов железобетонного каркаса при расчете на устойчивость по концепции пре-

дельной отпорности незначительно уменьшился по сравнению с линейным расчетом железобетонного каркаса на устойчивость. Таким образом, условие устойчивости колонн и связей железобетонного каркаса с учетом неупругой работы его материалов по первой группе предельных состояний также выполнено.

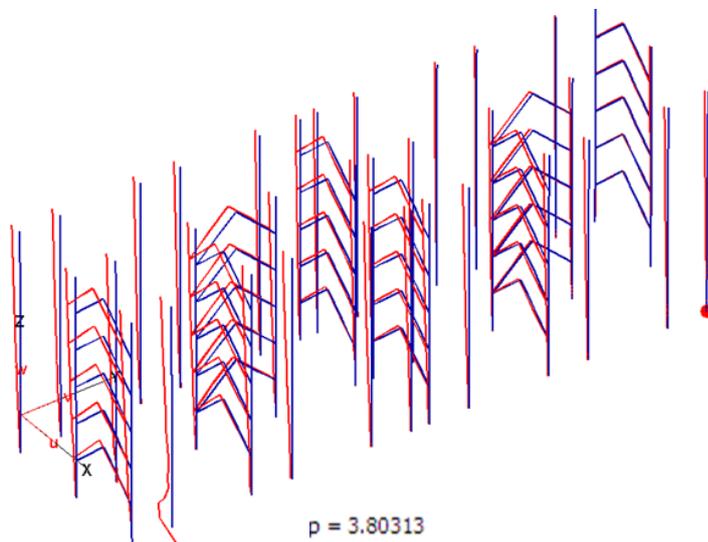


Рис. 4. Деформированная схема основной первой формы собственных колебаний в расчетной схеме № 3 ( $\times 30\ 000$ )

Fig. 4. Deformation scheme of fundamental vibrations in design model 3 (magnification:  $30000\times$ )

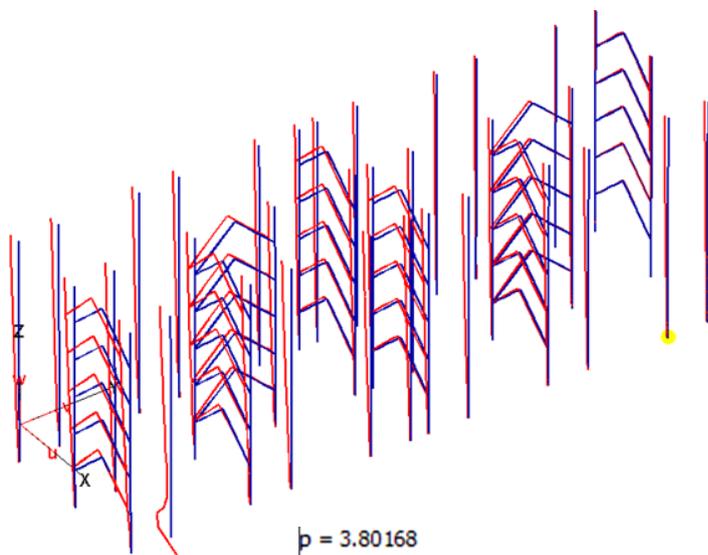


Рис. 5. Деформированная схема основной первой формы собственных колебаний в расчетной схеме № 4 ( $\times 30\ 000$ )

Fig. 5. Deformation scheme of fundamental vibrations in design model 4 (magnification:  $30000\times$ )

В заключение можно отметить, что в расчете железобетонного каркаса на действие статических нагрузок линейный расчет на устойчивость и физически нелинейный расчет на устойчивость по концепции предельной отпорности оказались не определяющими результатами расчета. При внецентренном сжатии колонн и связей каркаса линейный расчет железобетонного каркаса на прочность и нелинейный расчет железобетонного каркаса по теории предельных поверхностей конструктивных элементов являются достаточными и определяющими результатами расчета.

Принятые проектные значения поперечных сечений и армирование колонн и связей железобетонного каркаса достаточны для выполнения условий по первой группе предельных состояний. В этом случае, при заданном уровне статического нагружения железобетонного каркаса, основным критерием в подборе необходимых размеров поперечного сечения и армирования колонн и связей каркаса будет являться выполнение только условия прочности при линейной работе материалов и обеспечение несущей способности колонн и связей при нелинейном расчете по теории предельных поверхностей конструктивных элементов железобетонного каркаса экспериментального здания.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Унифицированная система* сборно-монолитного каркаса КУБ 2.5. Выпуск 1-1. Москва : Стройиздат, 1990. 49 с.
2. *Митасов В.М., Коянкин А.А.* Работа диска сборно-монолитного перекрытия // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 3. С. 103–104.
3. *Коянкин А.А., Митасов В.М.* Каркас сборно-монолитного здания и особенности его работы на разных жизненных циклах // Вестник МГСУ. 2015. № 9. С. 28–35.
4. *Маковский С.А., Новиков М.В., Маковская Т.А.* Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния монолитного перекрестно-ребристого перекрытия // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2017. № 2. С. 91–96.
5. *Яров В.А., Скрипальщиков К.В.* Безригельные монолитные перекрытия многоэтажных зданий с колоннами крестового сечения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2009. № 2. С. 97–91.
6. *Клюева Н.В., Колчунов В.И., Рыпаков Д.А., Бухтиярова А.С.* Прочность и деформативность сборно-монолитных каркасов жилых зданий пониженной материалоемкости при проектных воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 1. С. 5–9.
7. *Райзер В.Д.* К проблеме живучести зданий и сооружений // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 5. С. 77–78.
8. *Краснощеков Ю.В., Мельникова С.О., Екимов А.А.* Живучесть многоэтажного здания со связевым каркасом // Вестник СибАДИ. 2016. Вып. 2 (48). С. 100–104.
9. *Семенов Д.А.* Прочность железобетонных элементов при косом внецентренном сжатии // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 5. С. 76–84.
10. *Кудишин Ю.И.* К вопросу расчета начальных несовершенств при расчете стальных стержневых систем по деформированной схеме // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 3. С. 6–9.
11. *Катюшин В.В.* Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения (расчет, проектирование, строительство). Москва : Изд-во АСВ, 2018. 1071 с.
12. *Перельмутер А.В.* Использование критерия отпорности для оценки предельного состояния конструкции // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 12. С. 1559–1566.

#### REFERENCES

1. Unified reinforced concrete composite frame KUB 2.5. Issue 1-1. Moscow: Stroiizdat, 1990. 49 p. (In Russian)

2. *Mitasov V.M., Koyankin A.A.* Disc operation of reinforced concrete composite slab. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2014; (3): 103–104. (In Russian)
3. *Koyankin A.A., Mitasov V.M.* Prefabricated solid building frame and its properties in different life cycles. *Vestnik MGSU*. 2015; (9): 28–35. (In Russian)
4. *Makovskii S.A., Novikov M.V., Makovskaya T.A.* Finite element analysis of the stress-strain state of cast-in-place beam-and-slab floor. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki*. 2017; (2): 91–96. (In Russian)
5. *Yarov V.A., Skripal'shchikov K.V.* Reinforced concrete composite frame without collar beams with X cross-section. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2009; (2): 97–91. (In Russian)
6. *Klyueva N.V., Kolchunov V.I., Rypakov D.A., Bukhtiyarova A.S.* Strength and deformability of prefabricated monolithic frames of residential buildings of reduced material intensity under off-design impacts. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2015; (1): 5–9. (In Russian)
7. *Raizer V.D.* Toward the building robustness. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2012; (5): 77–78. (In Russian)
8. *Krasnoshchekov Yu.V., Mel'nikova S.O., Ekimov A.A.* Survivability of multi-floor building with braced framing. *Vestnik SibADI*. 2016; 48 (2):100–104. (In Russian)
9. *Semenov D.A.* Strength of reinforced concrete elements under oblique eccentric compression. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2015; (5): 76–84. (In Russian)
10. *Kudishin Yu.I.* Calculation of initial imperfections of steel rod systems by deformation scheme. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2011; (3): 6–9. (in Russian)
11. *Katyushin V.V.* Buildings with steel frame frames of variable cross-section (calculation, design, construction). Moscow: ASV. 2018. 1071 p. (in Russian)
12. *Perelmuter A.V.* Repulsion criterion in estimating structural limit state. *Vestnik MGSU*. 2021; 16 (12): 559–1566. (in Russian)

#### Сведения об авторе

*Подшивалов Иван Иванович*, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, Томск, пл. Соляная, 2, [ivanpodchivalov@list.ru](mailto:ivanpodchivalov@list.ru)

#### Author Details

*Ivan I. Podshivalov*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, [ivanpodchivalov@list.ru](mailto:ivanpodchivalov@list.ru)

Статья поступила в редакцию 04.12.2023  
Одобрена после рецензирования 22.12.2023  
Принята к публикации 01.03.2024

Submitted for publication 04.12.2023  
Approved after review 22.12.2023  
Accepted for publication 01.03.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 2. С. 113–122.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (2): 113–122.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.07

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-113-122

EDN: IINRSB

## КОНЦЕПЦИЯ СМЕШАННОГО РЕШЕНИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БОЛЬШЕПРОЛЁТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**Владислав Валентинович Токарчук, Никита Яковлевич Цимбельман**  
*Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия*

**Аннотация.** *Актуальность.* В настоящее время существуют обоснованные причины нецелесообразности применения большепролётных сооружений или отдельных сложных конструктивных решений на сейсмоопасных территориях в силу высокой стоимости строительства. Вместе с тем большепролётные сооружения обладают высоким функциональным, эксплуатационным и экономически выгодным потенциалом, поэтому полный отказ от большепролётных сооружений, в том числе и уникальных, в регионах со сложными климатическими условиями и высокой сейсмичностью не всегда оправдан, а задача возведения таких конструкций остается актуальной.

Настоящая статья посвящена проблеме разработки способа защиты большепролётных сооружений от экстремальных особых воздействий и нагрузок – концепции смешанного решения регулирования напряженно-деформированного состояния большепролётных конструкций.

*Целью* работы является обоснование необходимости разработки специальной системы защиты сооружений, возводимых в том числе на сейсмических и удаленных территориях, от особых воздействий и нагрузок. Такая система представляет собой комбинированное решение, заключающееся в совместном применении системы сейсмоизоляции и системы управления напряженно-деформированным состоянием конструкций.

*Результаты.* Произведён обзор существующих ограничений в возможности возведения большепролётных сооружений на сейсмических территориях. Эти ограничения накладываются условиями строительства и закреплены в действующей нормативной базе.

В качестве основного способа защиты сооружений от возможных особых экстремальных нагрузок и воздействий предлагается применение систем сейсмоизоляции и систем управления напряженно-деформированным состоянием как по отдельности, так и совместно в единой системе. Рассматриваются существующие наработки в области сейсмоизоляции и в системах управления напряженно-деформированным состоянием.

*Выводы.* В заключение приводится перечень основных задач, которые необходимо решить в ходе разработки и проектирования системы защиты сооружения на основе концепции смешанного решения.

**Ключевые слова:** строительство на сейсмических территориях, напряженно-деформированное состояние, большепролётные сооружения, регулирование усилий, управление усилиями, управляемые конструкции, системы сейсмоизоляции

**Для цитирования:** Токарчук В.В., Цимбельман Н.Я. Концепция смешанного решения регулирования напряженно-деформированного состояния большепролётных конструкций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 113–122. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-113-122. EDN: IINRSB

## ORIGINAL ARTICLE

**CONCEPT OF COMBINED STRAIN-STRESS STATE CONTROL OF LONG SPAN STRUCTURES****Vladislav V. Tokarchuk, Nikita Ya. Tsimbel'man***Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

**Abstract. Purpose:** Argumentation of necessity of special protective system design to protect structures in seismic zones and remote areas from specific loads. Such protective system combines seismic isolation and internal force control systems.

**Research findings:** Restrictions of long-span structures construction are reviewed. Such restrictions are caused by building conditions embodied in National Building Codes and Standards. Combined and separate use of seismic isolation and internal force control systems is a critical specific load protection. Present inventions and experience in the field of seismic isolation and internal force control systems are reviewed.

**Value:** The article determines problems of protective system design based on the control for combined strain-stress state.

**Keywords:** construction in seismic zones, strain and stress state, long-span structures, internal force regulation, internal force control, controlled structures, seismic isolation systems

**For citation:** Tokarchuk V.V., Tsimbel'man N.Ya. Concept of combined strain-stress state control of long span structures. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 113–122. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-113-122. EDN: IINRSB

**Существующие ограничения конструктивных решений зданий и сооружений, возводимых в сейсмических районах**

Возможность возведения большепролётных сооружений промышленного и гражданского назначения, транспортных сооружений (мостовых переходов и эстакад) на сейсмоопасных территориях существенно ограничена. Объективными ограничениями при проектировании и строительстве зданий и сооружений на сейсмических территориях является невозможность восприятия конструкциями усилий без разрушения и превышения допустимых деформаций, а также нецелесообразность строительства ввиду экономической неэффективности. Последняя из групп причин в современных условиях преодолевается соответствующим экономическим обоснованием конкретного инвестиционного проекта, поскольку часто сравнительно высокая ожидаемая доходность либо государственные репутационные задачи оправдывают значительные вложения в строительство. Это особенно характерно для государственных проектов улучшения инфраструктуры добывающей промышленности и транспортной инфраструктуры на удалённых территориях, которые нередко являются сейсмоопасными. Согласно карте ОСР-2016А, до 27,6 % (для ОСР-2016В – до 32,3 %)¹ территории РФ относятся к сейсмически опасным

¹ СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\*. Москва: Стандартинформ, 2018; Уломов В.И., Богданов М.И., Трифонов В.Г. и др. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населённых пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах. 12 с.

регионам, в том числе районы Восточной Арктики и Субарктики (Курильские острова, о. Сахалин, п-ов Камчатка и др.).

Основные требования к проектированию зданий и сооружений на сейсмических территориях установлены СП 14.13330.2018. Наиболее значимым условием, ограничивающим спектр применяемых типов конструктивных решений, является сейсмичность района строительства, определяющая интенсивность сейсмического воздействия на конструкции зданий и сооружений. В зависимости от назначения зданий и сооружений, согласно табл. 5.3 СП 14.13330.2018, производится выбор комплекта карт общего сейсмического районирования (ОСР), по которым определяется нормативная сейсмичность участка строительства (7, 8 и 9 баллов по шкале MSK-64). Это значение может быть скорректировано в зависимости от грунтовых условий площадки строительства (табл. 5.1 СП 14.13330.2018). Уточнение сейсмичности возможно по результатам проведения детального сейсмического районирования, а также при применении требований региональных нормативных документов: например, согласно Постановлению Администрации Приморского края<sup>2</sup>, сейсмичность отдельных районов г. Владивостока выше, чем фоновая сейсмичность столицы ДФО, указанная в СП 14.13330.2018.

Дополнением к первому условию, ограничивающему выбор применяемых конструктивных решений, является обязательное использование в ходе выполнения расчёта сооружения расчётных коэффициентов (коэффициент надёжности по ответственности  $\gamma_n$  по ГОСТ 27751–2014<sup>3</sup>, коэффициент ответственности  $K_o$  (СП 14.13330.2018)), увеличивающих значения нагрузок, в том числе и интенсивность сейсмического воздействия, а значит, приводящих к росту материалоёмкости конструкций сооружения. Согласно ГОСТ 27751–2014, коэффициент надёжности по ответственности  $\gamma_n$  для сооружений класса КС-3 (с пролётами более 100 м и консолями, имеющими вылет более 20 м) равен 1,1, а для сооружений с пролётом более 120 м – 1,2. Согласно табл. 5.1 СП 14.13330.2018, коэффициент ответственности  $K_o$  для сооружений с пролётами более 60 м равен 1,1 и для сооружений с пролётами более 100 м – 1,2.

Вторая группа условий изложена в табл. 6.1а – 6.1д СП 14.13330.2018, где перечислены предельные конструктивные требования, ограничивающие высоту сооружений и их размеры в плане в зависимости от типа и материала несущих конструкций. Например, согласно п. 8 табл. 6.1а, на площадке с сейсмичностью 9 баллов невозможно возведение склада из деревянных конструкций с высотой стоек (до низа стропильных конструкций) более 8 м. Однако подобные конструктивные ограничения для большепролётных конструкций в нормативной документации отсутствуют.

На основе совокупности требований нормативных документов выполняется расчёт, в ходе которого производится подбор требуемых сечений несущих конструкций зданий и сооружений. Завершающая часть этого этапа проектирования даёт ответ на вопрос о возможности применения большепролётных кон-

<sup>2</sup> Постановление Администрации Приморского края от 21 декабря 2016 года № 593-па «Об утверждении региональных нормативов градостроительного проектирования в Приморском крае».

<sup>3</sup> ГОСТ 27751–2014. Надёжность строительных конструкций. Основные положения. Москва: Стандартинформ, 2019.

струкций или иных сложных конструктивных решений в конкретных условиях. В отдельных расчётных случаях подбор сечений несущих конструкций не будет возможен ввиду отсутствия подходящих профилей в существующем сортаменте, а перечень применяемых материалов не позволит обеспечить прочность и устойчивость конструкций. В иных случаях значительная материалоемкость, обусловленная расчётом, повысит стоимость конструкций, за которой последует увеличение сложности осуществления и стоимости доставки строительных материалов при условии их доступности. Для монтажа тяжелых и объёмных конструктивных элементов необходимо применение мощных грузоподъёмных механизмов, которые тоже нужно доставить на строительную площадку. Дополнительные сложности в планировании строительства может внести недостаточная развитость транспортной инфраструктуры.

Естественным образом формируется вывод о нецелесообразности применения большепролётных сооружений или отдельных сложных конструктивных решений на сейсмоопасных территориях в силу высокой стоимости строительства. Однако подобные сооружения обладают большим функциональным, эксплуатационным и экономически выгодным потенциалом, поэтому полный отказ от большепролётных сооружений, в том числе и уникальных, в регионах со сложными климатическими условиями и высокой сейсмичностью нецелесообразен, а задача возведения таких конструкций остается актуальной. Ряд специальных мер, перечисленных в следующем разделе, может способствовать расширению области применения большепролётных конструкций.

#### **Направления расширения области применения большепролётных конструкций**

Значительный вклад в переоценку возможности строительства большепролётных сооружений на сейсмических территориях может внести применение специальных мер, повышающих сейсмостойкость большепролётных конструкций. Следует выделить три связанных с этим основных направления: снижение интенсивности нагрузок и воздействий на входе в расчётную систему (увеличение уровня демпфирования системы), регулирование усилий в элементах конструкций (принудительное изменение напряжённо-деформированного состояния) и применение смешанного решения, включающего элементы первых двух направлений.

#### **Снижение величины и характера нагрузок и воздействий на входе в расчётную систему**

Снижение величины нагрузок и воздействий на входе в расчётную систему является широко распространённым методом повышения сейсмостойкости зданий и сооружений. Достичь снижения сейсмического воздействия на сооружения можно путем применения систем сейсмоизоляции сооружений. Система сейсмоизоляции в общем случае представляет собой совокупность специальных элементов, снижающих сейсмическое воздействие на конструкции. Основное место расположения специальных сейсмоизолирующих элементов в сооружении – узлы контакта фундаментов с надфундаментными конструкциями, поскольку в этой зоне возникает передача сейсмических воздействий от среды (грунтовое основание сооружения) к конструктивным элементам сооружения.

Простейшим методом сейсмоизоляции сооружений считается устройство демпфирующих прослоек между основанием сооружения и фундаментом. В качестве первых демпферов-прослоек применялись подушки из гончарной глины [1], горизонтальные швы из тощего лессового раствора с песком [2] и камышовые пояса [1]. Демпферы-прослойки позволяли частично рассеять энергию землетрясения и тем самым снизить нагрузку на вышерасположенные несущие конструкции здания.

Принцип работы демпферов-прослоек был развит в сейсмоизолирующих фундаментах. Сейсмоизолирующие фундаменты являются широко применяемым решением, принцип действия которого основан на демпфировании энергии землетрясения. Согласно работе [3], сейсмоизолирующие фундаменты относятся к системам стационарной сейсмоизоляции. Разделять сейсмоизолирующие фундаменты можно на две основные группы (по наличию или отсутствию усилия, возвращающего сейсмоизолированную часть сооружения в исходное положение). Первая группа – упругие и кинематические опоры гравитационного типа (предусмотрена возможность возвращающего усилия). Вторая группа – скользящие пояса (возвращающая сила отсутствует). Конструктивные исполнения таких фундаментов различны. Современная строительная индустрия имеет значительный опыт успешного применения систем сейсмоизоляции [4; 5, с. 195–206], в числе которых используют резинометаллические опоры [5, 6, 7], кинематические опоры В.В. Назина [8], А.В. Курзанова [9], Ю.Д. Черпинского [10], скользящие пояса С.В. Полякова [11]. Исследования систем сейсмоизоляции принадлежат Я.М. Айзенбергу [12], И.Л. Корчинскому, Т.Ж. Жунусову [13], В.Л. Мондрусу [14] и др.

### Регулирование усилий в элементах конструкций

Разрушение элементов конструкций происходит от возникновения в них критических усилий (реакций) [15]. Для снижения значений усилий в элементах конструкций до докритических можно произвести ввод противоусилия или контрусил (контрнагрузки). Такой принцип наиболее известен как ввод предварительного напряжения. Широкое распространение предварительное напряжение получило в железобетонных конструкциях. Реже предварительное напряжение применяют в стальных конструкциях. В предварительном напряжении ввод контрусил представляет собой разовое вводимое регулирование на максимальную нагрузку заранее и навсегда (например, натяжение арматуры на бетон в построечных условиях или натяжение арматуры на упоры в заводских условиях). Но существует направление, которое предполагает регулирование усилий в процессе эксплуатации конструкций, т. е. регулирование усилий во времени. Основоположниками принципиально нового направления являются А.В. Перельмутер [16] и Н.П. Абовский [17], в трудах которых прослеживается последовательное развитие исследований от регулирования напряженно-деформированного состояния (НДС) к управлению им.

Основными достижениями в изучении вопросов регулирования НДС конструкций являются примененные на практике поэтапные методы проектирования с детальным изучением НДС сооружения на разных этапах жизненного цикла с последующим внесением изменений в расчетную схему с целью

создания безаварийных некритических условий для работы сооружения и снижения его материалоемкости<sup>4</sup> [18, 19, 20].

Принципиальным отличием активного управления НДС от регулирования НДС (и от принципов преднапряжения) является контроль значения вводимой «контрнагрузки» в элементы сооружения на основании воздействующих на сооружение нагрузок и текущего НДС сооружения. Таким образом, контрнагрузка вводится во время эксплуатации сооружения, а не перед или во время создания конструкции, как это происходит в случае предварительно напряженных конструкций. Значения контрнагрузки изменяются во времени и обоснованы данными, получаемыми в реальном времени с использованием системы датчиков деформаций, установленных на сооружении в критических точках. Обработку данных производят электронно-вычислительные машины (ЭВМ), далее ЭВМ автоматически принимает решение о вводе ответной реакции, которая защитит конструкцию от разрушения – введёт контрнагрузку. В отдельных случаях обработку данных может осуществлять оператор (человек). Совокупность совместно функционирующих ЭВМ, датчиков, фиксирующих текущее НДС сооружения, каналов передачи информации и устройств для ввода контрнагрузки называется системой управления напряженно-деформированным состоянием.

Основными достижениями в области управления НДС сооружений является разработка ряда систем и устройств, способных управлять НДС сооружения в автоматическом режиме с помощью ЭВМ. Существует ряд принципиальных схем и опытных изделий, общие принципы работы которых отражены в следующих патентных материалах:

1. Патент на изобретение RU 2770026. Регулируемая конструкция фермы (Бандурин М.А. и др., 2021). Изобретение состоит из фермы, стержни которой объединены в треугольные группы, стержни снабжены тензодатчиками, информация с тензодатчиков передается на блок управления. Каждый стержень выполнен из двух частей, соединенных муфтой-компенсатором, муфта снабжена приводом, который запускается управляемым двигателем по сигналу с блока управления. Муфты-компенсаторы позволяют с помощью прокручивания стержней изменять их длину в небольших пределах, тем самым равномерно перераспределять усилия между стержнями в ферме.

2. Патент на изобретение RU 2073839. Способ повышения несущей способности многопролетной неразрезной балки и устройство для осуществления предлагаемого способа (Абовский Н.П. и др., 1993). На многопролетную неразрезную балку установлены датчики деформаций, передающие информацию на ЭВМ. При действии на балку переменной по величине и точке приложения нагрузки ЭВМ передает сигнал на опоры, смещающиеся в поперечном направлении, тем самым повышая несущую способность балки.

3. Патент на изобретение RU 2122188. Способ автоматического управления несущей способностью многопролетной неразрезной балки и устройство для его реализации (Абовский Н.П. и др., 1997). Изобретение является

<sup>4</sup> Поляков Е.В. Регулирование НДС строительных конструкций при статических и динамических нагрузках: направление 08.04.01 «Строительство»: выпускная квалификационная работа (диссертация магистра). Красноярск, 2022. 111 с.

модернизированной версией изобретения, описанного в п. 2. Улучшение системы достигнуто введением автоматизированного управления конструкции с помощью ЭВМ с нейропрограммой (встроенной нейросетью).

Продолжение научных исследований систем управления НДС конструкций, последующее их практическое использование и приспособление для большепролётных сооружений позволят расширить область применения большепролётных сооружений, в том числе на сейсмических территориях.

### Концепция смешанного решения

Высокий уровень защиты большепролётных сооружений от сейсмического воздействия может быть обеспечен путём применения смешанного решения: совместного использования системы сейсмоизоляции и системы управления НДС конструкций. В случае возникновения сейсмического воздействия применение сейсмических демпферов позволит рассеять часть сейсмического воздействия, а нерассеявшаяся часть, прошедшая в сооружение, будет равномерно распределена по нему с помощью системы управления НДС. Одновременное действие систем сейсмоизоляции и управления НДС позволит достичь наибольшего защитного эффекта при появлении критических усилий в его элементах, возникающих от сейсмических воздействий. Таким образом будет обеспечена минимально необходимая материалоемкость сооружения, возводимого на сейсмических территориях (или в зоне действия иных особых воздействий), с целью его надёжной и безаварийной эксплуатации.

### Выводы

Перечень основных задач в части применения систем сейсмоизоляции в составе концепции смешанного решения:

- изучение существующих систем сейсмоизоляции большепролётных сооружений;
- разработка методики выбора наиболее подходящих для большепролётных сооружений систем сейсмоизоляции, способных функционировать совместно с системами управления НДС.

Управление НДС, являющееся одной из составных частей смешанного решения, в сравнении с системами сейсмоизоляции, представляет собой сравнительно слабо развитое направление, основу которого составляют концептуальные идеи, принципиальные схемы и опытные установки, применение которых не доведено до практической реализации.

Для создания пригодной к использованию при проектировании большепролётных сооружений системы управления НДС в составе концепции смешанного решения необходима проработка следующих вопросов:

- изучение существующих наработок в области управления НДС, пригодных для работы совместно с наиболее эффективными системами сейсмоизоляции;
- поиск или разработка наиболее эффективных и практически применимых способов изменения НДС сооружений;
- разработка методики определения и назначения критических точек (и их количества) в системе (сооружении) для установки датчиков изменения НДС;
- создание методики определения и назначения точек (и их количества) в системе для установки устройств управления НДС;

- определение минимально допустимых скоростей обработки сигналов, идущих от датчиков к ЭВМ, в системах управления НДС;
- определение минимально допустимых скоростей ввода реакций в элементы конструкций из условий обеспечения их работоспособности;
- определение минимальных скоростей видоизменения системы в ходе управления НДС из условий обеспечения её работоспособности.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кириков Б.А. Древнейшие и новейшие сейсмостойкие конструкции. Москва : Наука, 1990. 72 с.
2. Смирнов В.И. Сейсмоизоляция – современная антисейсмическая защита зданий в России // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. № 4. С. 41–54.
3. Маковецкий О.А., Карнаухова М.Ю., Кашеварова В.А., Кузнецова Ю.А., Лезина К.С. Конструктивные методы защиты зданий при сейсмических воздействиях // Вестник ПТО РААСН. 2018. № 21. С. 187–194.
4. Выскребенцева М.А., Ву Ле Куен. Методы сейсмогашения и сейсмоизоляции с применением специальных устройств // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1. С. 23–53.
5. Мустакимов В.Р. Проектирование сейсмостойких зданий. Казань : Изд-во КГАСУ, 2016. 344 с.
6. Саргсян А.Е., Джинчвелашвили Г.А. Оценка сейсмостойкости и сейсмоустойчивости сооружений с сейсмоизолирующими опорами // Транспортное строительство. 1998. № 11. С. 19–23.
7. Мкртычев О.В., Мкртычев А.Э. Анализ эффективности резинометаллических опор при строительстве высотных зданий в сейсмических районах // Вестник НИЦ «Строительство». 2017. № 2. С. 126–137.
8. Назин В.В. Индустриализация строительства сооружений сейсмостойкой конструкции. Киев : Будивельник, 1977. 92 с.
9. Курзанов А.В., Ахмедов А.М. Натурные исследования трехэтажного фрагмента и пятиэтажного здания на сейсмоизолирующих опорах // Экспресс-информация ВНИИИТПИ. Сер. Сейсмостойкое строительство. 1994. № 2–3. С. 24–32.
10. Жунусов Т.Ж., Черепинский Ю.Д., Горовиц И.Г. Активная сейсмозащита зданий и сооружений. Алма-Ата : Изд-во КазНИИИТИ, 1985. 34 с.
11. Поляков С.В. Опыт возведения зданий с сейсмоизолирующим скользящим поясом в фундаменте. Москва : Стройиздат, 1984. 32 с.
12. Айзенберг Я.М. Адаптивные системы сейсмической защиты сооружений. Москва : Наука, 1978. 246 с.
13. Корчинский И.Л., Жунусов Т.Ж. Кардинальные вопросы сейсмостойкого строительства. Алма-Ата : Изд-во: Казпромстройинипроект, 1988. 131 с.
14. Курбацкий Е.Н., Мондрус В.Л., Пестрякова Е.А. К вопросу о корректном задании исходной сейсмической информации // Строительные науки. 2021. № 1. С. 134–143.
15. Стоценко А.А., Доценко С.И., Мальков Н.М., Белоконь М.А. Курс теории сооружений. В 3 частях. Ч. 1. Теория сооружений в инженерном деле. Концепция сил в строительной механике. Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 1994. 175 с.
16. Перельмутер А.В. Управление поведением несущих конструкций. Киев : Изд-во УФИМБ, 1998. 148 с.
17. Абовский Н.П. Управляемые конструкции – САУ НДС. Красноярск : Изд-во КИСИ, 1995. 125 с.
18. Корнеев М.М. Стальные мосты: Теоретическое и практическое пособие по проектированию мостов в двух томах. Киев : Академпресс, 2010. Т. 1. 532 с.
19. Ситников И.Р., Голиков А.В. Регулирование усилий в большепролётных конструкциях при разработке рациональной конструктивной формы здания дельфинария в Волгограде // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. № 14 (4). С. 278–292.
20. Беленя Е.И. Металлические конструкции. Москва : Стройиздат, 1982. 472 с.

REFERENCES

1. Kirikov B.A. The oldest and latest earthquake-resistant structures. Moscow: Nauka, 1990. 72 p. (In Russian)
2. Smirnov V.I. Seismic isolation as modern anti-seismic building protection in Russia. *Seismostoitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2013; (4): 41–54. (In Russian)
3. Makovetskii O.A., Karnaukhova M.Yu., Kashevarova V.A., Kuznetsova Yu.A., Lezina K.S. Structural protection of buildings under seismic loads. *Vestnik PTO RAASN*. 2018; (21): 187–194. (In Russian)
4. Vyskrebentseva M.A., Vu Le Kuen. Methods of seismic damping and insulation using special devices. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2019; (1): 23–53. (In Russian)
5. Mustakimov V.R. Design of earthquake-resistant buildings. Kazan: KGASU, 2016. 344 p. (In Russian)
6. Sargsyan A.E., Dzinchvelashvili G.A. Seismic and earthquake resistance of structures with seismic isolating supports. *Transportnoe stroitel'stvo*. 1998; (11): 19–23. (In Russian)
7. Mkrtychev O.V., Mkrtychev A.Eh. Analysis of effectiveness of rubber-metal supports in construction of high-rise buildings in seismic areas. *Stroitel'stvo*. 2017; (2): 126–137. (In Russian)
8. Nazin V.V. Industrialization of earthquake-resistant structure construction. Kiev: Budivel'nik, 1977. 92 p. (In Russian)
9. Kurzanov A.V., Akhmedov A.M. Field studies of three-story fragment and five-story building on seismic isolating supports. *Ehkspress-informatsiya VNIINTPI. Ser. Seismostoitel'stvo*. 1994; (2–3): 24–32. (In Russian)
10. Zhunusov T.Zh., Cherepinskiy Yu.D., Gorovits I.G. Active seismic protection of buildings and structures. Almaty, 1985. 34 p. (In Russian)
11. Polyakov S.V. Experience in building construction with seismic isolating sliding belt in the foundation. Moscow: Stroiizdat, 1984. 32 p. (In Russian)
12. Aizenberg Ya.M. Adaptive systems for seismic protection of structures. Moscow: Nauka, 1978. 246 p. (In Russian)
13. Korchinskiy I.L., Zhunusov T.Zh. Fundamental issues of earthquake-resistant construction. Almaty: Kazpromstoiniiproekt, 1988. 131 p. (In Russian)
14. Kurbatskii E.N., Mondrus V.L., Pestryakova E.A. Correct specification of initial seismic load. *Stroitel'nye nauki*. 2021; (1): 134–143. (In Russian)
15. Stotsenko A.A., Dotsenko S.I., Mal'kov N.M., Belokon' M.A. Theoretic course on structures. Part 1: Theory of structures in engineering. Concept of forces in structural mechanics, in 3 parts. Vladivostok, 1994. 175 p. (In Russian)
16. Perel'muter A.V. Control for load-bearing structure behavior. Kiev, 1998. 148 p. (In Russian)
17. Abovskii N.P. Controllable structures. Krasnoyarsk, 1995. 125 p. (In Russian)
18. Korneev M.M. Steel bridges: Theoretical and practical guide to bridge design, in 2 Vol. Vol. 1. Kiev: Akadempress, 2010. 532 p. (In Russian)
19. Sitnikov I.R., Golikov A.V. Regulation of forces in long-span structures in developing rational structural form of dolphinarium in Volgograd. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii*. 2018; 14 (4): 278–292. (In Russian)
20. Belenya E.I. Metal structures. Moscow: Stroiizdat, 1982. 472 p. (In Russian)

**Сведения об авторах**

Токарчук Владислав Валентинович, аспирант, Дальневосточный федеральный университет, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, tokarchuk.vv@dvfu.ru

Цимбельман Никита Яковлевич, канд. техн. наук, доцент, Дальневосточный федеральный университет, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, tsimbelman.nya@dvfu.ru

**Authors Details**

Vladislav V. Tokarchuk, Research Assistant, Far Eastern Federal University, 10, Ajax Bay, 690922, Russky Island, Vladivostok, Russia, tokarchuk.vv@dvfu.ru

Nikita Ya. Tsimbel'man, PhD, A/Professor, Far Eastern Federal University, 10, Ajax Bay, 690922, Russky Island, Vladivostok, Russia, tsimbelman.nya@dvfu.ru

**Вклад авторов**

*Токарчук В.В.* – сбор и обзор литературных сведений, написание статьи, научное редактирование текста, подготовка к публикации.

*Цимбельман Н.Я.* – формулировка идеи статьи, дополнение литературных сведений, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Authors contributions**

*Tokarchuk V.V.* literature review, writing – review and editing and original draft preparation.

*Tsimbel`man N.Ya.* conceptualization, writing – review and editing.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.01.2024  
Одобрена после рецензирования 13.02.2024  
Принята к публикации 19.03.2024

Submitted for publication 04.01.2024  
Approved after review 13.02.2024  
Accepted for publication 19.03.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 2. С. 123–131.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (2): 123–131.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.014

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-123-131

EDN: KGRKTU

# АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ ГОФРИРОВАННЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ВЫТЯЖКОЙ НИЖНЕГО ПОЯСА

**Николай Леонидович Тишков, Анастасия Сергеевна Фомина**

*Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия*

**Аннотация.** *Актуальность.* Рациональное распределение материалов в конструкциях является актуальной научно-технической задачей. Гофрированные и предварительно напряжённые стальные конструкции зарекомендовали себя как эффективные и надежные. Данная работа направлена на совершенствование конструктивных решений балок двутаврового сечения с тонкой поперечно-гофрированной стенкой за счет создания предварительного напряжения в нижнем поясе.

*Цель исследования* – изучение работы стальной двутавровой балки с тонкой гофрированной стенкой, предварительно напряженной вытяжкой нижнего пояса.

В настоящей работе представлены конечно-элементные модели балок с гофрированными и плоской стенками (модель с плоской стенкой; базовая модель с поперечно-гофрированной стенкой; модель с нисходящими гофрами – угол наклона образующих гофров 20°; модель с восходящими гофрами – угол наклона образующих гофров 20°). Приведен способ задания предварительного напряжения на нижний пояс моделей балок при помощи отрицательного температурного воздействия. В ходе осуществленного численного эксперимента с использованием программного комплекса «ЛИРА-САПР» получены изополя распределения напряжений и деформированные схемы, выполнен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния рассматриваемых моделей.

**Выводы.** По результатам проведенного исследования установлено: картина распределения нормальных напряжений в поясах гофрированных балок с предварительным напряжением и без него под действием внешней нагрузки имеет незначительные отличия; предварительное напряжение дает значительные выгибы конструкций, при этом наибольший выгиб показывает гофрированная балка с восходящими гофрами.

**Ключевые слова:** двутавровая балка, гофрированная стенка, предварительное напряжение, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов

**Для цитирования:** Тишков Н.Л., Фомина А.С. Анализ напряженно-деформированного состояния стальных гофрированных двутавровых балок, предварительно напряженных вытяжкой нижнего пояса // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 123–131. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-123-131. EDN: KGRKTU

## ORIGINAL ARTICLE

**STRESS-STRAIN STATE OF STEEL CORRUGATED I-BEAMS PRESTRESSED BY FLANGE DRAWING****Nikolay L. Tishkov, Anastasia S. Fomina***Pacific National University, Khabarovsk, Russia*

**Abstract.** The material distribution in structures is an urgent scientific and technical problem. Corrugated and prestressed steel structures are efficient and reliable.

**Purpose:** The aim of this paper is to study the operation of steel I-beam with a thin corrugated wall, prestressed by flange drawing.

**Methodology/approach:** Finite element modeling of beams with corrugated and flat walls (models with flat wall, transversely corrugated wall, downward corrugation at an angle of inclination 20 degrees, ascending corrugation at an angle of inclination 20 degrees). The proposed method is used for prestressing the lower beam flange using negative temperature effects. Numerical experiments in LIRA-SAPR software allow to obtain the stress distribution isofields and deformation patterns. A comparative analysis of the stress-strain state.

**Research findings:** The normal stress distribution over flanges of corrugated beams with and without prestress under the external load has low difference. Prestress produces significant deflections of structures and the greatest deflection of the beam with ascending corrugations.

**Keywords:** I-beam, corrugated wall, prestressing, stress-strain state, finite element method

**For citation:** Tishkov N.L., Fomina A.S. Stress-strain state of steel corrugated I-beams prestressed by flange drawing. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 123–131. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-123-131. EDN: KGRKTU

**Введение**

Исследования в области пролетных гофрированных конструкций в России берут свое начало с испытаний В.Н. Горновым (1936 г.) балок с тонкой поперечно-гофрированной стенкой. За более чем 80 лет работа балок двутаврового сечения с тонкой поперечно-гофрированной стенкой достаточно изучена и доказана высокая эффективность их применения, но это не останавливает ученых, которые делают попытки в развитии оценки напряженно-деформированного состояния [1, 2, 3, 4, 5], совершенствуют конструктивные решения [6, 7, 8], комбинируют материалы [9, 10].

Настоящая работа направлена на совершенствование конструктивных решений балок двутаврового сечения с тонкой поперечно-гофрированной стенкой за счет попытки внедрения предварительного напряжения в нижнем поясе. Такая технология предполагает поэтапное изготовление: вытяжка нижнего поясного листа до напряжений, близких к пределу текучести стали; сварка нижнего пояса (в растянутом состоянии) с тавровой заготовкой с гофрированной стенкой; снятие растягивающих усилий с нижнего пояса. Сами по себе предварительно напряженные стальные конструкции достаточно изучены и обладают рядом достоинств [11, 12]. Таким образом, объединение двух эффективных конструктивных решений может оказаться перспективным направлением.

Предметом исследования является изучение напряженно-деформированного состояния стальной двутавровой балки с тонкой гофрированной стенкой, предварительно напряженной вытяжкой нижнего пояса.

### Цели и задачи

Цель работы: исследование работы стальной двутавровой балки с тонкой гофрированной стенкой, предварительно напряженной вытяжкой нижнего пояса.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Созданы конечно-элементные модели стальных балок с гофрированными и плоской стенками в программном комплексе «ЛИРА-САПР».
2. Произведен расчет и оценка напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов при трех вариантах загрузки (в том числе с моделированием предварительного напряжения).
3. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов исследования.

### Моделирование и результаты расчета

Для оценки напряженно-деформированного состояния балок, предварительно напряженных вытяжкой нижнего пояса, использовался программный комплекс «ЛИРА-САПР», в котором были созданы модели четырех балок. Рассматриваемые модели имеют одинаковые параметры поперечного сечения и гофрирования, граничные условия, нагрузки и свойства материалов. Задача решалась в упругой постановке.

*Параметры моделей:*

- расчетная схема – однопролетная шарнирно опертая балка;
- пролет – 6 м;
- поперечное сечение: высота стенки – 50 см, толщина гофрированной стенки – 0,2 см, толщина плоской стенки – 0,2 см, толщина поясов – 0,8 см, ширина поясов – 20 см;
- параметры гофрирования стенки: длина полуволны – 12 см, высота полуволны – 2 см, профиль гофров – треугольный;
- материал: нижний и верхний пояса – сталь С345, стенка – сталь С245.

*Виды загрузки моделей:*

- равномерно распределенная нагрузка интенсивностью 800 кг/м (приложена к верхнему поясу в пределах контакта стенки и пояса);
- температурное воздействие, равное  $-145,714$  °С (приложено к нижнему поясу);
- равномерно распределенная нагрузка и температурное воздействие.

*Виды моделей балок:*

- модель с плоской стенкой (рис. 1, а);
- базовая модель (рис. 1, б) – угол наклона образующих гофров  $0^\circ$  от плоскости поперечного сечения;
- модель с восходящими гофрами (рис. 1, в) – угол наклона образующих гофров  $20^\circ$ ;
- модель с нисходящими гофрами (рис. 1, г) – угол наклона образующих гофров  $20^\circ$ .

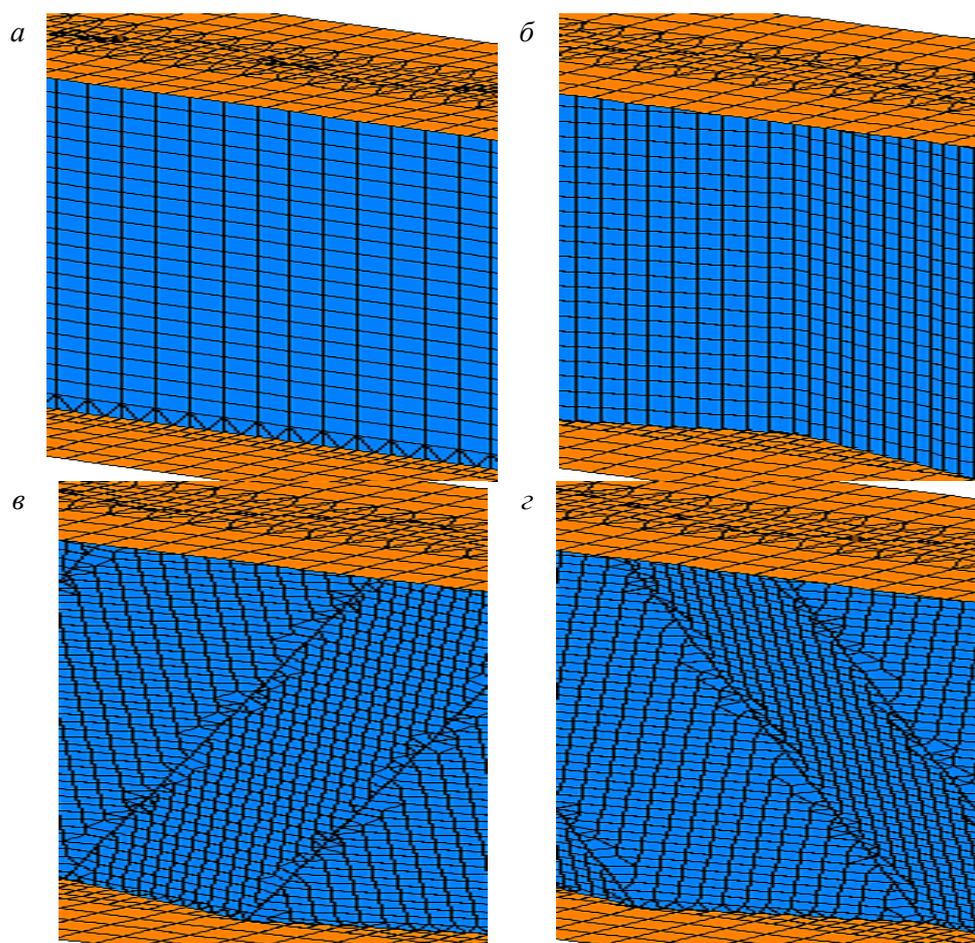


Рис. 1. Фрагменты конечно-элементных моделей балок:

*a* – модель с плоской стенкой; *б* – базовая модель; *в* – модель с восходящими гофрами; *г* – модель с нисходящими гофрами

Fig. 1. FEMs of beams:

*a* – flat wall; *b* – corrugated wall; *c* – ascending corrugation; *d* – downward corrugation

Для моделирования предварительного напряжения в нижнем поясе балки по всей длине задана нагрузка в виде температурного воздействия  $T$ .

Величина температурного воздействия  $T$  должна иметь такое значение, при котором растягивающие нормальные напряжения  $\sigma$  имеют значения:

$$\sigma = 0,9R_y, \quad (1)$$

где  $R_y = 340$  МПа – расчетное сопротивление стали С345, определяемое по СП 16.13330.2017, прил. В.

По закону Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

где  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа – модуль упругости стали;  $\varepsilon$  – относительные деформации.

Относительная величина изменения линейных размеров от температурных воздействий определяется как

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta t, \quad (3)$$

где  $\alpha = 0,1 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  – коэффициент линейного расширения стали;  $\Delta t$  – температурный перепад.

Из выражения (2) с учетом (1) и (3) получено значение  $\Delta t$ :

$$\Delta t = \frac{0,9R_y}{E \cdot \alpha} = -145,714 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4)$$

Таким образом, во втором нагружении для моделирования предварительного напряжения задано температурное воздействие со следующими характеристиками:  $\alpha = 0,1 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\Delta t = -145,714 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Деформированные схемы конечно-элементных моделей от температурного воздействия представлены на рис. 2.

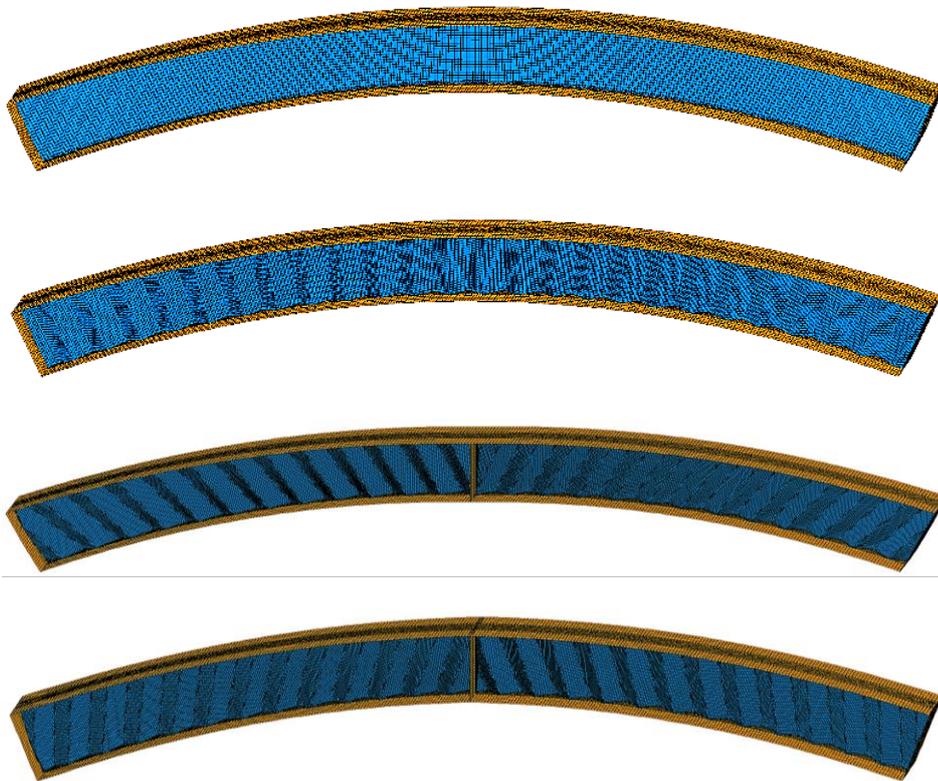


Рис. 2. Деформированные схемы конечно-элементных моделей от температурного воздействия  
 Fig. 2. FEMs of deformations at temperature influence

Основные результаты расчета моделей балок при равномерно распределенной нагрузке представлены в табл. 1 (для поперечных сечений, отнесённых от середины пролета на величины  $h/5$ ).

Таблица 1

## Результаты расчета балок от равномерно распределенной нагрузки

Table 1

## Strength analysis of beams at uniformly distributed load

Контролируемый параметр	Балка с плоской стенкой	Базовая модель	Балка с нисходящими гофрами	Балка с восходящими гофрами
Нормальные напряжения в середине пролета, кН/см <sup>2</sup>				
Прогиб в середине пролета, мм	-17,2	-18,7	-19,4	-19,3

Основные результаты расчета моделей балок при температурном воздействии представлены в табл. 2.

Таблица 2

## Результаты расчета балок от температурного воздействия

Table 2

## Strength analysis of beams at temperature effect

Контролируемый параметр	Балка с плоской стенкой	Базовая модель	Балка с нисходящими гофрами	Балка с восходящими гофрами
Нормальные напряжения в середине пролета, кН/см <sup>2</sup>				
Прогиб в середине пролета, мм	+11,9	+12,9	+11,5	+14,4

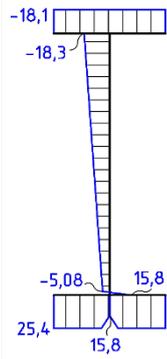
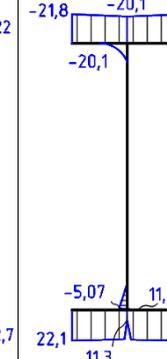
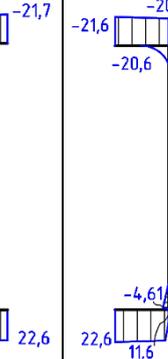
Основные результаты расчета моделей балок при одновременном действии равномерно распределенной нагрузки и температурного воздействия представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты расчета балок от равномерно распределенной нагрузки и температурного воздействия**

Table 3

**Strength analysis of beams at uniformly distributed load and temperature effect**

Контролируемый параметр	Балка с плоской стенкой	Базовая модель	Балка с нисходящими гофрами	Балка с восходящими гофрами
Нормальные напряжения в середине пролета, кН/см <sup>2</sup>				
Прогиб в середине пролета, мм	-5,28	-5,8	-7,9	-5,03

**Выводы**

На основании анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

– распределения нормальных напряжений в поясах гофрированных балок с предварительным напряжением и без него под действием внешней нагрузки имеют незначительные отличия (сжимающие напряжения в верхнем поясе имеют одинаковые значения, а в нижнем – отличаются на 3–4 %). Это вызвано особенностью работы гофрированных стенок, которые не способны воспринимать нормальные напряжения поперек гофров, поэтому наблюдается незначительный (по сравнению с плоскостенчатыми) прирост нормальных напряжений в нижнем поясе от предварительного напряжения;

– предварительное напряжение дает значительные выгибы конструкций, при этом наибольший выгиб показывает гофрированная балка с восходящими гофрами;

– за счет предварительного напряжения суммарный прогиб в гофрированных балках оказался меньше, чем прогиб в балках без преднапряжения, что дает возможность снизить строительную высоту перекрытия и увеличить пролет.

В ходе анализа результатов проведенного численного эксперимента установлено, что эффективность предварительного напряжения тонкостенных

гофрированных балок заключается в возможности снижения суммарной деформации конструкций без существенного изменения картины распределения нормальных напряжений.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Надольский В.В., Вихляев А.И. Оценка несущей способности балок с гофрированной стенкой методом конечных элементов при действии локальной нагрузки // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 6. С. 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.693-706
2. Макеев С.А., Силина Н.Г. Разработка методики уточненного расчета гофробалок на общую устойчивость // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 12. С. 52–60. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.52-60
3. Саиян С.Г., Паушкин А.Г. Численное параметрическое исследование напряженно-деформированного состояния двутавровых балок с различными типами гофрированных стенок // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 6. С. 676–687. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.676-687
4. Степаненко А.Н., Тишков Н.Л., Гузев А.Ю. О размерах участков тонкой поперечно-гофрированной стенки стальной двутавровой балки, работающей на продольные усилия // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 3 (42). С. 43–50.
5. Denan F., Shoong K.K., Hashim N.S., Ken C.W. Nonlinear analysis of triangular web profile steel section under bending behavior // Lecture Notes in Civil Engineering. 2019. № 9. P. 463–472.
6. Тишков Н.Л., Степаненко А.Н., Шипелев И.Л., Устименко М.Б. Совершенствование конструкции стальной двутавровой балки с тонкой поперечно-гофрированной стенкой // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 2. С. 104–111. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-104-111
7. Митрофанов С.В., Митрофанов В.А. Работа балки с гофрированной стенкой с различными профилями гофрирования // Строительство и техногенная безопасность. 2017. № 9 (61). С. 87–92.
8. Холопов И.С., Лукин А.О., Козырев П.Н. Совершенствование конструкции балки с гофрированной стенкой // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре : сборник статей / под ред. М.И. Бальзанникова, К.С. Галицкова, В.П. Попова. Самара : Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2015. С. 68–71.
9. Грачев В.А. Экспериментальное исследование металлодеревянной балки двутаврового сечения с поперечно-гофрированной стенкой // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство : сборник статей. Самара : Самарский государственный технический университет, 2019. С. 41–49.
10. Тишков Н.Л., Степаненко А.Н., Захарова Я.Ю. Обоснование оптимального профиля поперечно-гофрированной стенки металлодеревянной двутавровой балки // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. № 2 (47). С. 75–81. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-2-8
11. Кравчук В.А., Левина Г.В. Эффективность предварительно напряженных стальных тонкостенных балок // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 1 (40). С. 45–54.
12. Кравчук В.А., Кравчук Е.В. Развитие исследований предварительно напряженных строительных металлических конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6 (77). С. 86–92.

## REFERENCES

1. Nadolsky V.V., Vikhlyayev A.I. FEM of load-bearing capacity of beams with corrugated wall under localized load. *Vestnik MGSU*. 2022; 17 (6): 693–706. DOI 10.22227/1997-0935.2022.6.693-706 (In Russian)
2. Makeev S.A., Silina N.G. Methodology development for refined strength analysis of corrugated beam. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020; (12): 52–60. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.52-60 (In Russian)
3. Saiyan S.G., Paushkin A.G. Numerical parametric study of stress-strain state of I-beams with various types of corrugated walls. *Vestnik MGSU*. 2021; 16 (6): 676–687. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.676-687 (In Russian)

4. Stepanenko A.N., Tishkov N.L., Guzev A.Yu. Dimensions of sections of thin transversely corrugated wall of steel I-beam operating at longitudinal forces. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016; 3 (42): 43–50. (In Russian)
5. Denan F., Shoong K.K., Hashim N.S., Ken C.W. Nonlinear analysis of triangular web profile steel section under bending behavior. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2019; (9): 463–472.
6. Tishkov N.L., Stepanenko A.N., Shipelev I.L., Ustimenko M.B. Structural improvement of steel I-beam with thin transversely corrugated wall. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020; 22 (2): 104–111. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-104-111 (In Russian)
7. Mitrofanov S.V., Mitrofanov V.A. Beam operation with various corrugation profiles. *Stroitel'stvo i tekhnogen'naya bezopasnost'*. 2017; 9 (61): 87–92. (In Russian)
8. Kholopov I.S., Lukin A.O., Kozyrev P.N. Improved design of corrugated wall beam. In: *Coll. Papers "Traditions and Innovations in Construction and Architecture"*. M.I. Bal'zannikov, K.S. Galitskov, V.P. Popov, Eds., Samara, 2015. Pp. 68–71. (In Russian)
9. Grachev V.A. Experimental study of a metal-wood beam of I-section with a transversely corrugated wall. In: *Coll. Papers "Traditions and Innovations in Construction and Architecture"*, Samara, 2019. Pp. 41–49. (In Russian)
10. Tishkov N.L., Stepanenko A.N., Zakharova Ya.Yu. Justification of the optimum profile of transversely corrugated wall of metal-wood I-beam. *Vestnik Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*. 2021; 2 (47): 75–81. DOI 10.24866/2227-6858/2021-2-8 (In Russian)
11. Kravchuk V.A., Levina G.V. Efficiency of prestressed steel thin-walled beams. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016; 1 (40): 45–54. (In Russian)
12. Kravchuk V.A., Kravchuk E.V. Development of research into prestressed metal structures. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2019; 6 (77): 86–92.

#### Сведения об авторах

Тихов Николай Леонидович, канд. техн. наук, Тихоокеанский государственный университет, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, n.tishkov87@gmail.com

Фомина Анастасия Сергеевна, студентка, Тихоокеанский государственный университет, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, afomina425@gmail.com

#### Authors Details

Nikolay L. Tishkov, PhD, Pacific National University, 136, Tikhookeanskaya Str., 680035, Khabarovsk, Russia, n.tishkov87@gmail.com

Anastasia S. Fomina, Student, Pacific National University, 136, Tikhookeanskaya Str., 680035, Khabarovsk, Russia, afomina425@gmail.com

#### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Authors contributions

The authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 06.12.2023  
Одобрена после рецензирования 18.03.2024  
Принята к публикации 19.03.2024

Submitted for publication 06.12.2023  
Approved after review 18.03.2024  
Accepted for publication 19.03.2024

# ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

## WATER SUPPLY, SEWERAGE, BUILDING SYSTEMS OF WATER RESOURCE PROTECTION

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 2. С. 132–147.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (2): 132–147.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 628.171.001.24

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-132-147

EDN: LBCJAF

### МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ И ЧАСТОТЫ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫМИ ВОДРАЗБОРНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

**Дмитрий Евгеньевич Поливанов**

*Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет,  
г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** *Постановка задачи.* Значения расчетных расходов воды, получаемые при помощи существующих детерминированных моделей и методов, не могут отразить фактическую изменчивость режимов работы водопроводной сети. Однако данная задача может быть решена при помощи имитационного моделирования. Стохастическая природа процесса водопотребления подразумевает использование при его описании ряда случайных величин с определенными законами распределения, характеризующими основные составляющие данного процесса: интенсивность, продолжительность и частоту.

В настоящей работе рассматриваются вопросы математического описания продолжительности и частоты водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств: смесителями кухонной мойки и ванны (душевой кабины), унитазом со смывным бачком, стиральной и посудомоечной машинами.

**Цель работы** – обоснование метода математического моделирования продолжительности водопотребления различными водоразборными устройствами, а также частоты (вероятности) их использования в течение суток.

**Результаты.** Приведены результаты исследования продолжительности и частоты водопотребления различными водоразборными устройствами, использующими воду из внутрен-

ней системы водоснабжения здания. Представлены результаты анализа эмпирических данных, полученных в ходе исследования, а также расчетов, выполненных на их основе.

**Выводы.** Предложен и обоснован метод математического моделирования продолжительности непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств, а также частоты (вероятности) их использования в течение суток.

**Ключевые слова:** частота, продолжительность, система водоснабжения, водопотребление, расход воды, вероятностная модель, стохастический процесс

**Для цитирования:** Поливанов Д.Е. Метод моделирования продолжительности и частоты водопотребления различными водоразборными устройствами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 132–147. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-132-147. EDN: LBCJAF

## ORIGINAL ARTICLE

### MATHEMATICAL SIMULATION OF DURATION AND FREQUENCY OF WATER CONSUMPTION BY VARIOUS WATER DISPENSERS

**Dmitry E. Polivanov**

*Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,  
Saint-Petersburg, Russia*

**Abstract.** Water flow rates calculated by using deterministic models and methods do not describe the real variability in the water supply operation. This problem can be solved by mathematical simulation. The stochastic nature of the water consumption process implies involves random variables with certain distribution laws describing the main process components, namely intensity, duration and frequency.

This paper discusses the mathematical simulation of the duration and frequency of water consumption by the most common types of water dispensers (kitchen sink and bathtub faucets (shower cubicle), toilet bowl with flush tank, washing machine and dishwasher).

**Purpose:** The aim of this work is to evaluate and substantiate theoretical laws of the water consumption by the most common types of water dispensers as well as the frequency (probability) of their daily use.

**Research findings:** The duration and frequency are determined for water consumed by various water dispensers using water supply systems of buildings. The empirical data are analyzed. Mathematical simulation method is proposed and justified for the water consumption process.

**Keywords:** frequency, duration, water supply system, water consumption, probabilistic model, stochastic process

**For citation:** Polivanov D.E. Mathematical simulation of duration and frequency of water consumption by various water dispensers. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 132–147. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-132-147. EDN: LBCJAF

#### Введение

Применение информационных технологий набирает все большую популярность во всех сферах жизни современного человека. Растущие в геометрической прогрессии вычислительные мощности компьютеров открывают новые возможности, а их повсеместная распространенность делает эти возможности доступными почти каждому [1].

В сфере проектирования и строительства, например, как следствие данных изменений происходит постепенный переход от 2D-чертежей планов, разрезов и схем зданий и инженерных систем к их информационному моделированию (BIM) [2]. Не менее важным шагом в развитии и расширении возможностей анализа работы зданий и сооружений на этапе их проектирования, а соответственно, и обеспечения их дальнейшего комфортного и безопасного использования может стать переход от аналитических расчетных методик непосредственно к моделированию процессов, протекающих в них в период эксплуатации. Так, работу системы водоснабжения и качество ее функционирования невозможно детально рассмотреть и оценить на основании всего нескольких значений расчетного расхода, полученных по имеющимся аналитическим методикам, изложенным в действующих нормативных документах [3]. Традиционные детерминированные модели потокораспределения в системах водоснабжения также не позволяют достаточно подробно и точно охарактеризовать фактические режимы их работы, которые формируются под влиянием случайных воздействий внешней среды [4].

Стохастическая природа процесса водопотребления во многом обусловлена его зависимостью от огромного количества факторов [5, 6, 7, 8]. Высокая степень неопределенности и стохастический характер данного процесса подчеркивались многими отечественными [9, 10] и зарубежными [11, 12, 13, 14, 15] авторами. Среди опубликованных за последнее десятилетие можно выделить работы [16, 17].

Учесть большинство факторов, оказывающих влияние на водопотребление, не представляется возможным из-за их большого количества и неоднородного влияния на конечный результат. При этом, по мнению автора, решить задачу детального рассмотрения и оценки прогнозных режимов работы систем водоснабжения возможно при помощи вероятностного моделирования процесса водопотребления и его изменчивости во времени.

Внутренняя система водоснабжения любого здания или сооружения, использующего воду для удовлетворения хозяйственно-питьевых нужд потребителей, включает трубопроводы (разводящую сеть, стояки и подводки к санитарным приборам и технологическим установкам) и водоразборные устройства. Все трубопроводы могут быть разделены на отдельные участки, заключенные между характерными точками, расположенными в местах ответвлений трубопроводов. Среди выделенных участков ряд трубопроводов будут подавать воду только к одному водоразборному устройству (элементарный расход), ряд – к двум устройствам и т. д. (далее – трубопроводы первого порядка, трубопроводы второго порядка и т. д.). Соответственно, для трубопроводов первого порядка расход транспортируемой воды и время работы будут зависеть только от одного водоразборного устройства, для трубопроводов второго порядка – от двух и т. д. В итоге все трубопроводы здания объединятся в один – водопроводный ввод, по которому водой будет обеспечиваться все здание. Аналогичная ситуация наблюдается и в наружной сети водоснабжения, где количество абонентов увеличивается по направлению к резервуару чистой воды или насосной станции (РЧВ или НС) от наиболее удаленного от РЧВ или НС абонента [13].

Наличие сведений о величине каждого из обеспечиваемых по трубопроводу второго и выше порядка элементарных расходов еще не дает представления о расходе воды непосредственно в самом трубопроводе. Причиной является возможное полное совпадение, несовпадение или частичное совпадение во времени элементарных расходов воды.

Выявить наличие таких совпадений можно путем построения графиков в виде прямоугольных импульсов. Построение данных графиков для существующих объектов может быть выполнено на основании проведенных натурных измерений, а для проектируемых объектов – при помощи имитационного моделирования работы системы водоснабжения.

Таким образом, моделирование расходов воды в трубопроводах второго и выше порядка возможно осуществить лишь при наличии данных о временных интервалах, в которых возникает элементарный расход (или, другими словами, используется водоразборное устройство) с привязкой каждого из интервалов к конкретной точке наиболее характерного периода водопотребления (сутки).

Рассмотрению вопросов интенсивности водопотребления для различных типов водоразборных устройств посвящен ряд работ автора данной статьи, например [18].

В настоящей статье представлены результаты исследования продолжительности и частоты водопотребления различными типами водоразборных устройств, использующими воду из внутренней системы водоснабжения здания.

Целью работы является обоснование метода математического моделирования продолжительности водопотребления различными водоразборными устройствами, а также частоты (вероятности) их использования в течение суток.

Объект данного исследования – наиболее распространенные типы водоразборных устройств.

Предмет исследования – величина продолжительности периодов непрерывного водопотребления, а также частота (вероятность) водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств в течение суток.

Задачи исследования:

– получение статистических данных о продолжительности периодов непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств;

– построение графиков (гистограмм и кривых) плотности распределения продолжительности периодов непрерывного водопотребления на основе эмпирических данных;

– анализ эмпирических данных и результатов расчетов, выполненных на их основе;

– математическое описание характера изменчивости продолжительности периодов непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств, а также частоты (вероятности) их использования в течение суток (оценка и обоснование законов распределения рассматриваемых случайных величин).

### Материалы и методы

Описание условий, в которых выполнялось наблюдение за работой наиболее распространенных типов водоразборных устройств (смеситель кухонной мойки, смеситель ванны (душевой кабины), унитаз со смывным бачком, стиральная машина, посудомоечная машина), представлено в табл. 1.

Таблица 1

#### Условия выполнения измерений

Table 1

#### Measurement conditions

Наименование показателя	Значение
Назначение здания	Жилое
Место расположения водоразборных устройств	Квартира
Типы установленных смесителей	Рычажные (наборный и настенный с душевой сеткой на гибком шланге)
Количество потребителей	2 человека
Места установки датчиков	Трубопроводы систем холодного и горячего водоснабжения непосредственно перед подключением к каждому из рассматриваемых водоразборных устройств

Наблюдение выполнялось круглосуточно, без перерывов. Непрерывность наблюдения была обеспечена путем применения разработанной автором системы, подробное описание которой представлено в работе [19].

Обработка полученных эмпирических данных выполнялась в разработанной автором программе на языке C#, визуализация (построение гистограмм и графиков) и анализ данных – в авторской программе на языке R.

При анализе данных и обосновании выдвинутых гипотез применялись методы теории вероятностей и математической статистики.

Основой для выдвижения гипотезы о виде закона распределения послужили соображения о природе рассматриваемого процесса и его составляющих, а также гипотезы и обоснования, приведенные в ряде ранее опубликованных работах других авторов [11, 12, 15, 16, 20].

Оценка вида теоретических законов распределения продолжительности и частоты водопотребления была выполнена в результате сравнения эмпирических графиков плотности вероятности рассматриваемых выборок с известными теоретическими законами распределения случайных величин, а также на основании анализа рассчитанных по эмпирическим данным оценок основных числовых характеристик [21].

Оценка параметров теоретических законов распределения осуществлялась по эмпирическим данным методом максимального правдоподобия, ввиду его наилучших асимптотических свойств [22].

Расщепление смесей распределений было выполнено в программе на языке R, разработанной автором. В качестве метода декомпозиции смесей распределений применялся EM-алгоритм [23], реализованный в виде функции `normalmixEM` из пакета `mixtools`.

Уровень значимости, используемый при оценке однородности эмпирических данных и теоретических законов распределения, гипотезы о которых были выдвинуты в ходе исследования, был принят  $\alpha = 0,05$ .

Для оценки принадлежности рассматриваемых выборок нормальному закону распределения использовалась функция `shapiro.test` из пакета `stats`, позволяющая рассчитать уровень значимости для критерия Шапиро – Уилка.

Оценка однородности эмпирических выборок и теоретических законов распределения (за исключением нормального) была выполнена путем расчета уровня значимости критерия Колмогорова [24] и сравнения полученного значения с принятым ( $\alpha = 0,05$ ).

Расчет уровня значимости и статистики критерия Колмогорова был выполнен в разработанной автором программе на языке R с помощью функции `ks.test` из пакета `stats`.

### Результаты и обсуждение

В ходе исследования автором в сумме выполнено 12 746 измерений продолжительности периодов непрерывного водопотребления. Полученные результаты были сгруппированы по типам водоразборных устройств. После группировки количество значений в каждой из выборок составило:

- 1) для СМКх (смесителя кухонной мойки при использовании воды из системы холодного водоснабжения (ХВС)) – 4053;
- 2) для СМКг (смесителя кухонной мойки при использовании воды из системы горячего водоснабжения (ГВС)) – 2715;
- 3) для СМВх (смесителя ванны (душевой кабины) при использовании воды из системы ХВС) – 837;
- 4) для СМВг (смесителя ванны (душевой кабины) при использовании воды из системы ГВС) – 1628;
- 5) для Ух (сmyвного бачка унитаза при использовании воды из системы ХВС) – 2321;
- 6) для Пмх (посудомоечной машины при использовании воды из системы ХВС) – 469;
- 7) для Стх (стиральной машины при использовании воды из системы ХВС) – 723.

Чувствительность установленных датчиков позволяет фиксировать даже самые незначительные колебания его крыльчатки, в том числе вызванные резкими изменениями давления в системе водоснабжения здания при выключенном водоразборном устройстве. Как правило, продолжительность данного явления составляет от 1 до 4 с подряд, но при этом количество зафиксированных случаев за определенный период часто превышает количество случаев фактического использования водоразборного устройства. Для исключения влияния таких показаний на конечный результат анализа рассматриваемых данных и дальнейшие выводы было принято решение исключить все зафик-

сированные периоды непрерывной работы водоразборных устройств продолжительностью менее 5 с.

Эмпирические данные были сгруппированы по интервалам, обработаны и проанализированы в разработанной автором в среде R Studio программе на языке R.

Для повышения наглядности и простоты визуального восприятия по эмпирическим данным были построены гистограммы и кривые плотности вероятности продолжительности периодов непрерывного водопотребления. Ось ординат соответствует значениям плотности вероятности, ось абсцисс – продолжительности периода непрерывного водопотребления водоразборным устройством (единица измерения – секунда) (рис. 1).

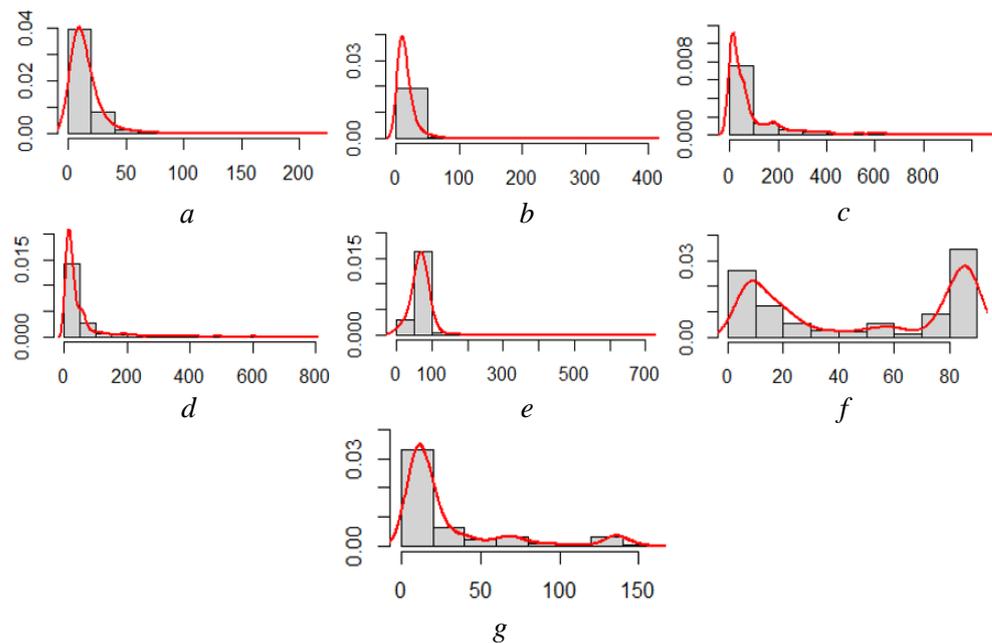


Рис. 1. Гистограммы и кривые плотности вероятности эмпирических значений продолжительности непрерывного использования водоразборных устройств:

*a* – СмКх; *b* – СмКг; *c* – СмВх; *d* – СмВг; *e* – Ух; *f* – Пмх; *g* – Стх

Fig. 1. Block diagrams and probability density curves of empirical values of continuous use of water dispensers:

*a* – MiKc; *b* – MiKh; *c* – MiBc; *d* – MiBh; *e* – Tc; *f* – Dwc; *g* – Wmc

Первичная оценка вида теоретического закона распределения выполнялась по оценкам основных числовых характеристик продолжительности непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств, рассчитанным по эмпирическим выборкам. Для получения исправленных (несмещенных) числовых характеристик случайной величины, при расчете оценок основных числовых характеристик, была сделана поправка.

Проанализировав полученные значения, можно утверждать, что средняя продолжительность непрерывного использования водоразборного устройства

(математическое ожидание) и среднеквадратичное отклонение имеют наименьшие значения для смесителя кухни, а наибольшие – для смесителя ванной (душевой кабины). Данный факт указывает на то, что смеситель кухни задействован меньшее количество времени, а длительность периодов непрерывного использования для данного устройства имеет наименьший разброс абсолютных значений. Однако наименьший разброс продолжительности непрерывного водопотребления относительно математического ожидания имеет смывной бачок унитаза. На время его заполнения оказывает влияние в основном неполный спуск накопленного объема воды (заниженное время наполнения) или повторный спуск воды при неполном заполнении объема бачка после первого спуска (завышенная продолжительность непрерывного водопотребления), что случается достаточно редко относительно суммарного времени использования устройства, а изменение периода непрерывного водопотребления в основном составляет несколько десятков секунд. На продолжительность периодов непрерывного водопотребления стиральной и посудомоечной машин непосредственный пользователь влияет лишь косвенно (только при установке режимов стирки и мойки), но при этом среднеквадратичное отклонение относительно математического ожидания данных выборок имеет гораздо большее значение, чем для смывного бачка унитаза, что в основном определяется программами, заложенными в основу их работы. Отрицательные коэффициенты асимметрии и эксцесса характерны только для посудомоечной машины.

Среди рассматриваемых водоразборных устройств нельзя явно выделить какие-либо группы по характеру изменчивости времени непрерывного использования. Для всех водоразборных устройств продолжительность периодов непрерывного водопотребления является случайной величиной. При этом характер ее изменчивости различен для всех устройств и определяется разными факторами. Так, для смесителей кухни и ванной (душевой кабины) основным определяющим фактором продолжительности периодов непрерывного использования является непосредственный пользователь и его психофизиологические потребности, для смывного бачка унитаза – достаточно редко возникающая потребность в неполном или повторном использовании накопленного в нем объема воды, а для посудомоечной и стиральной машин – программы, заложенные в основу их работы. Данные отличия существенны и должны быть учтены при разработке модели водопотребления.

Для включения обнаруженных характерных признаков каждого из водоразборных устройств в вероятностную модель водопотребления требуется описать каждую из рассматриваемых эмпирических выборок некоторым теоретическим законом распределения.

Внешний вид гистограмм и кривых плотности вероятности, представленных на рис. 1, дает первичное представление о том, какими теоретическими законами распределения может быть описана рассматриваемая случайная величина. При этом стоит отметить, что выборка продолжительности периодов непрерывного водопотребления посудомоечной машиной имеет явные признаки того, что ее математическое описание потребует применения смеси теоретических законов распределения. К таким признакам можно отнести, например, наличие двух ярко выраженных вершин.

В ходе выполнения статистического анализа полученных данных гипотеза о принадлежности всех рассматриваемых эмпирических выборок к закону нормального распределения была отвергнута на основании рассчитанного критерия Шапиро – Уилка.

В результате расчетов, выполненных по эмпирическим данным, а также сравнительной оценки графиков плотности вероятности известных теоретических законов распределения случайных величин с кривой плотности вероятности, построенной по эмпирическим данным, автором был выдвинут ряд гипотез о возможном теоретическом законе распределения, которым могут быть описаны рассматриваемые выборки. В качестве нулевых были взяты гипотезы о соответствии эмпирических выборок следующим теоретическим законам распределения:

- 1) логнормальному распределению ( $X \sim \log N(\mu, \sigma^2)$ );
- 2) распределению Вейбулла ( $X \sim W(k, \lambda)$ );
- 3) гамма-распределению ( $X \sim \Gamma(k, \theta)$ );
- 4) показательному (экспоненциальному) распределению ( $X \sim \exp(\lambda)$ ).

Рассчитанные оценки параметров рассматриваемых законов распределения для каждой из выборок приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Значения оценок параметров теоретических законов распределения**

Table 2

**Theoretical distribution parameters**

Наименование теоретического закона распределения	Обозначение параметра	СмКх	СмКг	СмВх	СмВг	Ух	Стх
Логнормальное распределение	$\mu$	2,45	2,51	3,66	3,44	4,11	2,95
	$\sigma$	0,676	0,675	1,31	1,13	0,529	0,887
Распределение Вейбулла	$k$	1,30	1,30	0,782	0,798	2,31	1,01
	$\lambda$	16,63	17,51	75,39	57,05	74,37	30,78
Гамма-распределение	$k$	2,05	2,08	0,726	0,778	5,19	1,19
	$\theta$	7,35	7,69	125	83,33	12,99	25,64
Экспоненциальное распределение	$\lambda$	0,066	0,063	0,011	0,015	0,015	0,033

Решение о наличии или отсутствии статистически значимых различий эмпирических выборок и рассматриваемых теоретических законов распре-

ления принималось на основании рассчитанного уровня значимости критерия Колмогорова для каждой из выборок.

Для эмпирических выборок продолжительности периодов непрерывного водопотребления смесителями кухни и ванной (душевой кабины) не было выявлено оснований для отклонения нулевой гипотезы о логнормальном теоретическом законе распределения. Рассчитанный уровень значимости  $\alpha$  составил:

- 1) для  $S_{mKx} - 0,072$ ;
- 2) для  $S_{mKg} - 0,057$ ;
- 3) для  $S_{mVx} - 0,062$ ;
- 4) для  $S_{mVg} - 0,209$ .

Для нулевых гипотез об однородности данных выборок и теоретических законов распределения Вейбулла, гамма-распределения и экспоненциального распределения были выявлены статистически значимые различия. Уровень значимости критерия Колмогорова во всех рассматриваемых случаях имеет значение менее принятого  $\alpha = 0,05$ , а следовательно, есть достаточные основания для отклонения этих гипотез.

Все нулевые гипотезы о виде теоретического закона распределения, которым могут быть описаны выборки продолжительности периодов непрерывного водопотребления смывным бачком унитаза и стиральной машиной, были отклонены, поскольку выполненные расчеты во всех рассматриваемых случаях показали наличие статистически значимых отклонений.

Таким образом, описание изменчивости продолжительности непрерывного водопотребления может быть выполнено:

- 1) для смесителя кухни при потреблении воды из системы холодного водоснабжения – логнормальным законом с параметрами  $\mu = 2,45$ ,  $\sigma = 0,676$ ;
- 2) для смесителя кухни при потреблении воды из системы горячего водоснабжения – логнормальным законом с параметрами  $\mu = 2,51$ ,  $\sigma = 0,675$ ;
- 3) для смесителя ванны (душевой кабины) при потреблении воды из системы холодного водоснабжения – логнормальным законом с параметрами  $\mu = 3,66$ ,  $\sigma = 1,31$ ;
- 4) для смесителя ванны (душевой кабины) при потреблении воды из системы горячего водоснабжения – логнормальным законом с параметрами  $\mu = 3,44$ ,  $\sigma = 1,13$ .

По внешнему виду гистограммы и кривой плотности вероятности, построенной для эмпирической выборки продолжительности периодов непрерывного водопотребления посудомоечной машиной, можно предположить, что данная выборка может быть описана смесью распределений (имеются две ярко выраженные вершины кривой). Резкий обрыв гистограммы в правой части свидетельствует о том, что следует применять усеченную смесь распределений с ограничением значений продолжительности непрерывной работы водоразборного устройства не более 90 с. Также, учитывая, что для выборок продолжительности периодов непрерывного водопотребления смывным бачком унитаза и стиральной машиной все нулевые гипотезы о виде теоретического закона распределения были отклонены, автор принял решение рассмот-

реть вариант математического описания данных выборок смесью теоретических законов распределения. В силу наличия физических особенностей рассматриваемой случайной величины (продолжительность периода), которая не может принимать отрицательные значения, было введено еще одно ограничение – усечение смесей снизу значением 0.

В результате расщепления смесей распределений и рассчитанного уровня значимости критерия Колмогорова было выявлено, что нет оснований для отклонения статистических гипотез о том, что рассматриваемые выборки могут быть описаны:

1) для смывного бачка унитаза при потреблении воды из системы холодного водоснабжения – усеченной снизу значением 0 смесью нормальных распределений с весами  $w_1 = 0,47$ ,  $w_2 = 0,53$  и параметрами  $\mu_1 = 67,15$ ,  $\mu_2 = 67,39$ ,  $\sigma_1 = 3,76$ ,  $\sigma_2 = 36,45$  соответственно;

2) для посудомоечной машины при потреблении воды из системы холодного водоснабжения – усеченной снизу и сверху значениями 0 и 90 соответственно смесью нормальных распределений с весами  $w_1 = 0,26$ ,  $w_2 = 0,17$ ,  $w_3 = 0,15$ ,  $w_4 = 0,12$ ,  $w_5 = 0,30$  и параметрами  $\mu_1 = 7,63$ ,  $\mu_2 = 19,04$ ,  $\mu_3 = 51,85$ ,  $\mu_4 = 80,36$ ,  $\mu_5 = 86,98$ ,  $\sigma_1 = 1,79$ ,  $\sigma_2 = 3,98$ ,  $\sigma_3 = 15,57$ ,  $\sigma_4 = 1,77$ ,  $\sigma_5 = 1,64$  соответственно;

3) для стиральной машины при потреблении воды из системы холодного водоснабжения – усеченной снизу значением 0 смесью нормальных распределений с весами  $w_1 = 0,53$ ,  $w_2 = 0,21$ ,  $w_3 = 0,07$ ,  $w_4 = 0,12$ ,  $w_5 = 0,07$  и параметрами  $\mu_1 = 9,95$ ,  $\mu_2 = 19,56$ ,  $\mu_3 = 37,13$ ,  $\mu_4 = 70,36$ ,  $\mu_5 = 136,50$ ,  $\sigma_1 = 1,82$ ,  $\sigma_2 = 3,02$ ,  $\sigma_3 = 5,46$ ,  $\sigma_4 = 15,96$ ,  $\sigma_5 = 8,17$  соответственно.

Рассмотренные выше теоретические законы распределения позволяют описать время непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств. Однако сведений только о продолжительности использования водоразборных устройств недостаточно для описания процесса водопотребления. Необходимо также выполнить описание частоты водопотребления данными водоразборными устройствами или, другими словами, распределения вероятностей использования водоразборных устройств в течение наиболее характерного периода водопотребления (сутки).

Возникновение расхода воды в трубопроводе (т. е. включение того или иного водоразборного устройства) в разные периоды суток не является равновероятным, поскольку напрямую зависит от режима жизни (работы) пользователей. Разные помещения эксплуатируются различным количеством пользователей, имеющих собственный уклад жизни, потребности и т. д. Даже в одном и том же помещении с течением времени могут меняться пользователи и их количество. Соответственно, распределение вероятностей потребления воды (использования водоразборных устройств) в течение суток будет изменяться как в каждом помещении, так и во времени [25].

Учесть индивидуальные особенности каждого конкретного помещения при моделировании водопотребления не представляется возможным, в том числе в силу крайне высокой трудоемкости данной задачи. Однако, по мнению автора, охарактеризовать частоту использования водоразборных

устройств в течение суток можно на основании данных о фактическом распределении суточного объема водопотребления для конкретного типа зданий. Так, для зданий жилого фонда такие сведения приведены в относительно недавно выполненном исследовании, авторы которого утверждают, что для рабочих и выходных дней в распределении суточного объема водопотребления наблюдаются отличия, а соответственно, данный факт должен быть учтен и при определении распределения вероятностей действия водоразборных устройств [25].

Графики, представленные в работе [25], можно рассматривать как эмпирическую кривую плотности вероятности действия водоразборного устройства или, другими словами, вероятности возникновения импульса, характеризующего водопотребление для конкретного устройства.

С учетом того, что все выполняемое исследование строится на допущении о том, что минимальным временным интервалом для оценки водопотребления является секунда, а одной из основных итоговых целей разработки модели водопотребления – оценка максимального секундного расхода воды, условные сутки, как наиболее характерный период водопотребления, были разделены на 86 400 равных временных интервалов, каждый из которых соответствует одной секунде.

По внешнему виду графиков фактического распределения суточного объема водопотребления можно предположить, что как для рабочих, так и для выходных дней описание вероятности водопотребления водоразборным устройством в течение суток можно выполнить с применением смесей теоретических законов распределения. Учитывая, что рассматриваемая величина представляет собой количество секунд в сутках и может принимать значения от 0 до 86 399 включительно, смесь распределений должна быть усечена снизу и сверху соответствующими значениями.

Описание вероятности водопотребления водоразборными устройствами в течение суток для рабочих и выходных дней, как показали выполненные расчеты и проверка выдвинутых статистических гипотез, может быть выполнено:

1) для рабочих дней – усеченной снизу и сверху значениями 0 и 86 399 соответственно смесью нормальных распределений с весами  $w_1 = 0,05$ ,  $w_2 = 0,05$ ,  $w_3 = 0,51$ ,  $w_4 = 0,15$ ,  $w_5 = 0,24$  и параметрами  $\mu_1 = 2529$ ,  $\mu_2 = 27\ 889$ ,  $\mu_3 = 39\ 772$ ,  $\mu_4 = 66\ 167$ ,  $\mu_5 = 77\ 376$ ,  $\sigma_1 = 2308$ ,  $\sigma_2 = 698$ ,  $\sigma_3 = 14\ 579$ ,  $\sigma_4 = 6726$ ,  $\sigma_5 = 4305$  соответственно;

2) для выходных дней – усеченной снизу и сверху значениями 0 и 86 399 соответственно смесью нормальных распределений с весами  $w_1 = 0,06$ ,  $w_2 = 0,68$ ,  $w_3 = 0,22$ ,  $w_4 = 0,04$  и параметрами  $\mu_1 = 3237$ ,  $\mu_2 = 45\ 539$ ,  $\mu_3 = 74\ 686$ ,  $\mu_4 = 76\ 337$ ,  $\sigma_1 = 2842$ ,  $\sigma_2 = 16\ 349$ ,  $\sigma_3 = 667$ ,  $\sigma_4 = 5337$  соответственно.

Визуализация результатов исследования представлена на рис. 2 в виде графиков эмпирических (ступенчатый график черного цвета) и теоретических (красная кривая) функций распределения.

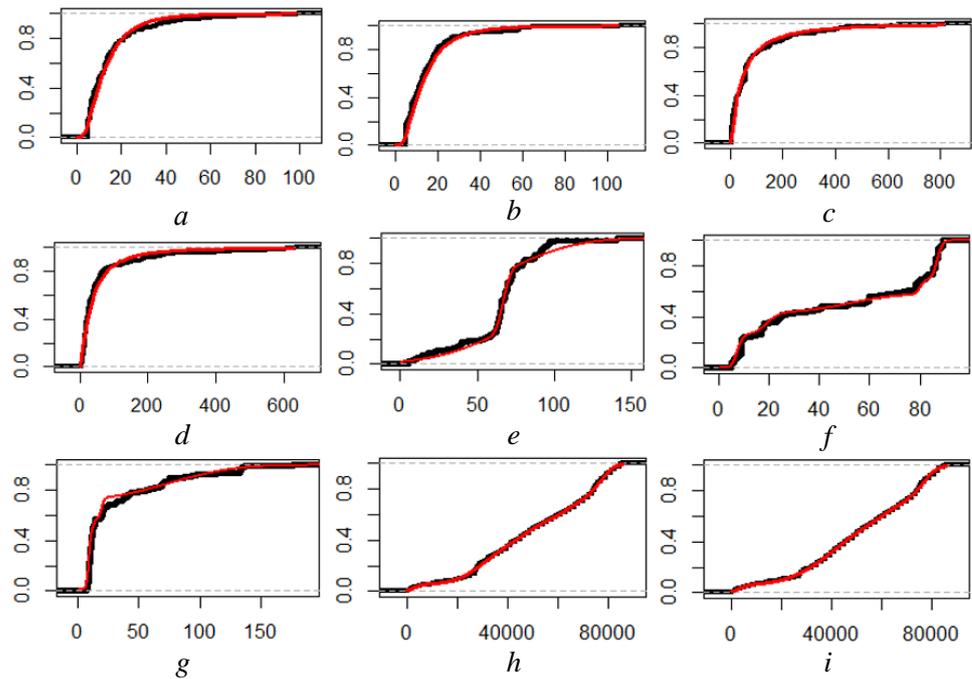


Рис. 2. Графики эмпирической и теоретической функций распределения рассматриваемых выборок:

$a$  – СмКх;  $b$  – СмКг;  $c$  – СмВх;  $d$  – СмВг;  $e$  – Ух;  $f$  – Пмх;  $g$  – Стх;  $h$  – рабочие дни;  $i$  – выходные дни

Fig. 2. Empirical and theoretical curves of distribution functions:

$a$  – MiKx;  $b$  – MiKh;  $c$  – MiBx;  $d$  – MiBh;  $e$  – Tc;  $f$  – Dwc;  $g$  – Wmc;  $h$  – working days;  $i$  – weekend

Ось ординат соответствует значениям функции распределения, ось абсцисс – продолжительности периода непрерывного водопотребления водоразборным устройством (единица измерения – секунда) или, для рабочих и выходных дней, времени суток, выраженном в секундах.

### Заключение

В ходе исследования автором был получен набор данных о продолжительности периодов непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств. По полученным эмпирическим данным построены гистограммы и кривые плотности распределения. На основании анализа построенных графиков, эмпирических данных и результатов расчетов, выполненных на их основе, выдвинуты статистические гипотезы о виде теоретического закона распределения, которым могут быть описаны рассматриваемые выборки.

В результате выполненного исследования предложен метод математического моделирования продолжительности непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств, а также частоты (вероятности) их использования в течение суток. Как показали расчеты уровня значимости для рассматриваемых выборок и теоретических законов

распределения, для описания изменчивости продолжительности периодов непрерывного водопотребления смесителями кухни и ванны (душевой кабины) может быть применен логнормальный закон распределения, а для смывного бачка унитаза, стиральной и посудомоечной машин – усеченная смесь нормальных распределений. Описание частоты использования водоразборных устройств в течение суток (как в рабочие, так и выходные дни) также может быть выполнено с применением смесей нормальных распределений.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Heidari A., Navimipour N.J., Unal M.* Applications of ML/DL in the management of smart cities and societies based on new trends in information technologies: A systematic literature review // *Sustainable Cities and Society*. 2022. V. 85. P. 104089.
2. *Гвоздицкий М.А., Огороднова Ю.В., Лейтес Д.С.* Принципы построения среды общих данных информационной модели строительного объекта в облачном сервисе // *Архитектура, строительство, транспорт*. 2022. № 3. С. 74–81. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-3-74-81
3. *СП 30.13330.2020.* Внутренний водопровод и канализация зданий. 2020.
4. *Новицкий Н.Н., Вантеева О.В.* Задачи и методы вероятностного моделирования гидравлических режимов трубопроводных систем // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2008. № 1 (53). С. 68–75.
5. *Салугин А.Н., Балкушкин Р.Н.* О применении искусственных нейронных сетей для моделирования водопотребления // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2021. № 1. С. 70–85. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-1-5
6. *Карамбилов С.Н., Уманский П.М., Бекишева Л.Б.* Распределение гидравлических параметров в системе подачи и распределения воды при штатных и послеаварийных режимах работы // *Природообустройство*. 2012. № 4. С. 48–51.
7. *Николенко И.В., Рыжаков А.Н.* Нелинейная модель оптимизации параметров силовых агрегатов насосной станции подкачки системы водоснабжения // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2019. № 4 (724). С. 47–63.
8. *Чупин В.Р., Душин А.С.* Оценка надежности водообеспечения эксплуатируемых систем подачи и распределения воды // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2009. № 3 (39). С. 186–191.
9. *Карамбилов С.Н., Манукьян Д.А., Бекишева Л.Б.* Оценка надежности подачи воды системами водоснабжения // *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2013. № 6. С. 63–65.
10. *Новицкий Н.Н., Вантеева О.В.* Моделирование стохастичности потокораспределения в гидравлических цепях // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2011. № 2. С. 122–131.
11. *Buchberger S.G., Wu L.* Model for instantaneous residential water demands // *Journal of Hydraulic Engineering*. 1995. V. 121. № 3. P. 232–246. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:3(232)
12. *Alvisi S., Franchini M., Marinelli A.* A stochastic model for representing drinking water demand at residential level // *Water Resources Management*. 2003. V. 17. P. 197–222.
13. *Vertommen I. et al.* Water demand uncertainty: the scaling laws approach. Rijeka, Croatia, 2012. 160 с.
14. *Buchberger S.G., Wells G.J.* Intensity, duration, and frequency of residential water demands // *Journal of Water Resources Planning and Management*. 1996. V. 122. № 1. P. 11–19. DOI: [https://doi.org/10.1061\(ASCE\)0733-9496\(1996\)122:1\(11\)](https://doi.org/10.1061(ASCE)0733-9496(1996)122:1(11))
15. *Blokker E., Vreeburg J.* Monte Carlo simulation of residential water demand: A stochastic end-use model // *Impacts of global climate change*. 2005. P. 1–12.
16. *Mazzoni F. et al.* Exploiting high-resolution data to investigate the characteristics of water consumption at the end-use level: A Dutch case study // *Water Resources and Industry*. 2023. V. 29. P. 100198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wri.2022.100198>

17. Vertommen I., Magini R., Cunha M. Scaling water consumption statistics // *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2014. V. 141. № 5. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000467
18. Поливанов Д.Е., Семенов А.А. Исследование режима отбора воды смесителем из системы водоснабжения // *Известия КГАСУ*. 2023. № 2 (64). С. 60–69. DOI: 10.52409/20731523\_2023\_2\_60
19. Поливанов Д.Е., Семенов А.А. BIM-технологии с элементами программирования при анализе режимов работы внутренних сетей водоснабжения зданий // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры (BIMAC 2023). Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2023. С. 81–91. DOI: 10.23968/BIMAC.2023.012
20. Garcia V.J. et al. Stochastic model to evaluate residential water demands // *Journal of water resources planning and management*. 2004. V. 130. № 5. P. 386–394.
21. Волгин П.Н., Масленникова Т.Н. Определение теоретического закона распределения случайных величин, используемых в имитационной модели // *Морская радиоэлектроника*. 2010. № 3–4 (33–34). С. 74–78.
22. Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Семенова М.А. К вопросу статистического анализа больших данных // *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2018. № 44. С. 40–49. DOI: 10.17223/19988605/44/5
23. Dempster A.P., Laird N.M., Rubin D.B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm // *Journal of the royal statistical society: series B (methodological)*. 1977. V. 39. № 1. P. 1–22.
24. Колмогоров А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика : сб. статей. Москва : Наука, 1986. 535 с.
25. Игнатчик В.С., Саркисов С.В., Обвинцев В.А. Исследование коэффициентов часовой неравномерности водопотребления // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2017. № 2 (70). С. 27–39. DOI: 10.23968/2305-3488.2017.20.2.27-39

## REFERENCES

1. Heidari A., Navimipour N.J., Unal M. Applications of ML/DL in the management of smart cities and societies based on new trends in information technologies: A systematic literature review. *Sustainable Cities and Society*. 2022; 85: 104089.
2. Gvozditsky M.A., Ogorodnova Yu.V., Leites D.S. Principles of building shared data environment of information model of construction object in a cloud service. *Arkhitektura, stroitel'stvo, transport*. 2022; (3): 74–81. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-3-74-81 (In Russian)
3. SP 30.13330.2020 "Internal water supply and sewerage of buildings". 2020. (In Russian)
4. Novitsky N.N., Vanteeva O.V. Tasks and methods of probabilistic modeling of hydraulic modes of pipeline systems. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2008; 1 (53): 68–75. (In Russian)
5. Salugin A.N., Balkushkin R.N. Artificial neural networks for water consumption modeling. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*. 2021; (1): 70–85. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-1-5 (In Russian)
6. Karambirov S.N., Umansky P.M., Bekisheva L.B. Distribution of hydraulic parameters in water supply and distribution system under normal and post-emergency operating modes. *Prirodobustroistvo*. 2012; (4): 48–51. (In Russian)
7. Nikolenko I.V., Ryzhakov A.N. Nonlinear model for parameter optimization of pumping station units for water supply systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2019; 4 (724): 47–63. (In Russian)
8. Chupin V.R., Dushin A.S. Reliability assessment of water supply and distribution systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2009; 3 (39): 186–191. (In Russian)
9. Karambirov S.N., Manukyan D.A., Bekisheva L.B. Reliability assessment of water supply and distribution systems. *Doklady Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk*. 2013; (6): 63–65. (In Russian)
10. Novitsky N.N., Vanteeva O.V. Modeling of flow distribution stochastics in hydraulic circuits. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika*. 2011; (2): 122–131. (In Russian)

11. Buchberger S.G., Wu L. Model for instantaneous residential water demands. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1995; 121 (3): 232–246. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:3(232)
12. Alvisi S., Franchini M., Marinelli A. A stochastic model for representing drinking water demand at residential level. *Water Resources Management*. 2003; 17: 197–222.
13. Vertommen I., et al. Water demand uncertainty: The scaling laws approach. Rijeka, Croatia, 2012. 160 p.
14. Buchberger S.G., Wells G.J. Intensity, duration, and frequency of residential water demands. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 1996; 122 (1): 11–19. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1996\)122:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:1(11))
15. Blokker E., Vreeburg J. Monte Carlo simulation of residential water demand: A stochastic end-use model. *Impacts of Global Climate Change*. 2005. Pp. 1–12.
16. Mazzoni F., et al. Exploiting high-resolution data to investigate the characteristics of water consumption at the end-use level: A Dutch case study. *Water Resources and Industry*. 2023; 29: 100198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wri.2022.100198>
17. Vertommen I., Magini R., Cunha M. Scaling water consumption statistics. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2014; 141 (5). DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000467
18. Polivanov D.E., Semenov A.A. Water extraction by mixer from water supply system. *Izvestiya KGASU*. 2023; 2 (64): 60–69. DOI: 10.52409/20731523\_2023\_2\_60 (In Russian)
19. Polivanov D.E., Semenov A.A. BIM technologies with programming elements in analysis of operating modes of water supply in buildings. In: BIM modeling in construction and architecture tasks. Saint-Petersburg, 2023. Pp. 81–91. DOI: 10.23968/BIMAC.2023.012 (In Russian)
20. Garcia V.J., et al. Stochastic model to evaluate residential water demands. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2004; 130 (5): 386–394.
21. Volgin P.N., Maslennikova T.N. Definition of theoretical distribution law of random variables in simulation model. *Morskaya radioelektronika*. 2010; 3–4 (33–34): 74–78. (In Russian)
22. Lemeshko B.Yu., Lemeshko S.B., Semenova M.A. Statistical analysis of big data. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*. 2018; (44): 40–49. DOI: 10.17223/19988605/44/5 (In Russian)
23. Dempster A.P., Laird N.M., Rubin D.B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (methodological)*. 1977; 39 (1): 1–22.
24. Kolmogorov A.N. Probability theory and mathematical statistics. Moscow: Nauka, 1986. 535 p. (In Russian)
25. Ignatchik V.S., Sarkisov S.V., Accusantsev V.A. Coefficients of hourly unevenness of water consumption. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*. 2017; 2 (70): 27–39. DOI: 10.23968/2305-3488.2017.20.2.27-39 (In Russian)

#### Сведения об авторе

Дмитрий Евгеньевич Поливанов, аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, dmitry\_polivanov@mail.ru

#### Author Details

Dmitry E. Polivanov, Research Assistant, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Красноармейская Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia, dmitry\_polivanov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.02.2024  
Одобрена после рецензирования 24.03.2024  
Принята к публикации 25.03.2024

Submitted for publication 13.02.2024  
Approved after review 24.03.2024  
Accepted for publication 25.03.2024

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

## CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 2. С. 148–156.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (2): 148–156.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.42.:658.567.1

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-148-156

EDN: NELLGY

### ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВТОРИЧНОГО АНГИДРИТОВОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

**Любовь Александровна Аниканова**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия*

**Аннотация.** *Актуальность.* В статье рассматриваются вопросы применения фторангидрита в качестве добавки при производстве керамических материалов, что позволяет экономить природное глиняное сырье и решать экологические задачи. В работе показана возможность использования вторичного сырья для производства зернистых и штучных керамических материалов.

*Цель исследования* – разработка керамических материалов и технологических принципов их производства с применением вторичного фторангидритового сырья, определение условий образования керамического черепка и способов повышения прочности керамических образцов.

*При этом решались следующие задачи:* выбор и исследование основных характеристик материалов: вещественного, гранулометрического состава, технологических свойств глин, кислого фторангидрита, обоснование технологических приемов и оценка параметров качества керамических материалов.

*Материалы и методы.* В работе использован кислый фторангидрит без дополнительной обработки, зола ТЭЦ, которая снижает среднюю плотность изделий и способствует получению гранул при обжиге. В качестве расплавообразующей добавки вводились натриевое жидкое стекло (ГОСТ 13078–81) и алюминиевая пудра (ГОСТ 5494–95) для возможного получения муллитоподобных образований. Исследование фазового состава и структурных параметров образцов проводилось на дифрактометре XRD-6000

(Shimadzu, Япония). Для приготовления шихты глину сушили до постоянной массы с последующим измельчением в щековой дробилке и совместным помолотом с расчетным количеством кислого фторангидрита.

*Результаты и практическая значимость.* Представлены исследования зернистых и штучных керамических стеновых материалов с требуемыми для керамических изделий свойствами. Установлены технологические режимы сушки и обжига, а также основные эксплуатационные характеристики. Определены строительно-технические характеристики кислого фторангидрита для производства керамических материалов, предложены способы его модифицирования, что позволяет снизить расходы минерального сырья на единицу продукции, решать экологические вопросы.

*Новизна.* Установлены особенности производства керамических материалов с использованием вторичного сырья и зависимости, позволяющие регулировать состав и свойства зернистых и штучных материалов.

**Ключевые слова:** фторангидрит, глина, жидкое стекло, алюминиевая пудра, зернистые и штучные керамические материалы

*Для цитирования:* Аниканова Л.А. Особенности применения вторичного ангидритового сырья для производства керамических материалов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 148–156. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-148-156. EDN: NELLGY

## ORIGINAL ARTICLE

### ACID FLUORIDE IN CERAMIC MATERIAL PRODUCTION

**Lyubov' A. Anikanova**

*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

**Abstract. Purpose:** The aim of this work is to develop fluorine anhydrite-based ceramic materials and engineering concept for their production and identify the conditions for the ceramic body formation and strength improvement.

**Methodology/approach:** Acid fluoride without additional processing and ash from thermal power plants are used in the experiment. Sodium silicate solution and the aluminum powder are introduced in the melt for the mullite formation. The phase composition is investigated on a Shimadzu XRD-6000 Diffractometer. Clay is dried to prepare the mixture and then it is ground in a jaw breaker and co-milled with the specific amount of acid fluoride.

**Research findings:** Granular and piece ceramic wall materials with the required properties are obtained. Drying and firing conditions and the main performance characteristics are determined herein.

**Practical implications:** Construction and technical characteristics of acid fluoride are detected for the ceramic material production, the proposed methods can be used for ceramics modification, allowing to reduce expenditures per unit of output for mineral raw materials.

**Originality:** Process conditions are determined for the ceramics production, and dependencies are suggested to control the composition and properties of granular and piece ceramic wall materials.

**Keywords:** acid fluoride, clay, sodium silicate solution, aluminum powder, granular and piece ceramics, wall material

**For citation:** Anikanova L.A. Acid fluoride in ceramic material production. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 148–156. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-148-156. EDN: NELLGY

## Введение

Отличительной особенностью сырьевой базы для производства строительных материалов является использование вторичного сырья различных химических производств. Существенное внимание уделяется применению местного вторичного сырья в производстве керамических строительных материалов с требуемыми эксплуатационными характеристиками, обеспечивающими высокую экологическую безопасность и низкую стоимость. Рационально выбранное сырье, вовлеченное в технологический процесс производства строительных материалов, позволяет решать проблемы ресурсо- и энергосбережения в строительной отрасли России [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Материалы и изделия на основе сульфатов кальция отличаются низкой плотностью, малой тепло- и звукопроводностью, огнестойкостью, декоративностью, что дает возможность использовать их как в новом строительстве, так и при производстве материалов в составе сырьевой смеси для производства шихты. В качестве ангидритовой составляющей можно применять вторичное сырье производства фторидов – фторангидрит (ФТА), химический состав и классификация которого представлены в публикациях с участием автора [8, 9, 10, 11, 12, 13].

Возможность производства керамических материалов на основе кислого фторангидрита объясняется наличием в составе вкраплений неразложившегося исходного флюорита кальция, сульфата кальция, который представлен в виде зернистого и мелкокристаллического ангидрита с адсорбированной на кристаллической решетке остаточной серной кислотой [8]. Отдельные участки структуры фторангидрита имеют скрытокристаллическое строение, состоящее из сульфата кальция, который обеспечивает минимальную обжиговую усадку изделий, ускоряет реакции силикатообразования.  $\text{CaF}_2$  является хорошим плавнем и в сочетании с  $\text{CaSO}_4$  снижает его температуру плавления [5]. По результатам проведенных исследований установлено, что во фторангидрите при нагревании до  $200\text{ }^\circ\text{C}$  происходят процессы испарения  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и разложения  $\text{CaF}_2$  [1, 2].

Проведенные физико-химические исследования фторангидрита, представленные в работах [9, 13], показали наличие эндоэффекта при температурах, соответствующих разложению двухводного гипса и ангидрита, уменьшение линейных размеров и массы образца. Эндотермический эффект при  $330\text{ }^\circ\text{C}$  вызван кипением азеотропа серной кислоты. Повышение содержания  $\text{H}_2\text{SO}_4$  во фторангидрите ведет к усилению этого эффекта. На рентгенограммах, полученных при  $200$  и  $250\text{ }^\circ\text{C}$ , заметно уменьшение интенсивности линий, соответствующих  $\text{CaF}_2$ . По данным кристаллооптического анализа исходный фторангидрит представлен кристаллами в агрегатах ( $1\text{--}5\text{ }\mu\text{м}$ ). В ходе термообработки из межкристаллического пространства удаляется  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , агрегаты распадаются, а кристаллы растут. Фторангидрит, прокаленный при температуре  $300\text{ }^\circ\text{C}$ , представлен кристаллами квадратно-ромбического габитуса. В работах [6, 13] установлено, что при температурах  $400\text{--}420\text{ }^\circ\text{C}$  находящиеся в составе остатки серной кислоты разлагаются на  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , которые в газообразном состоянии выделяются в атмосферу; с повышением температуры свыше  $660\text{ }^\circ\text{C}$  происходит разложение части ангидрита на  $\text{CaO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$  [6]. Спекание фторангидрита, сопровождающееся нарушением кристаллической решетки, начинается при температуре выше  $740\text{ }^\circ\text{C}$  [13, 14].

### Материалы и методы

В работе использован кислый фторангидрит с содержанием остаточной серной кислоты 5,5 %, который без дополнительной обработки и химической модификации непригоден для производства строительных изделий из-за медленной гидратации, схватывания и низких прочностных характеристик. Температура образования вторичного сырья составила 160 °С. Для сравнительных исследований образцов по величине прочности на сжатие применена методика малых образцов. Основные характеристики фторангидрита представлены в табл. 1. Для снижения средней плотности керамических изделий в качестве отошающей добавки применялась зола Северской ТЭЦ фракций 0,16–0,315 мм. В качестве расплавообразующей добавки использованы натриевое жидкое стекло (ГОСТ 13078–81) и алюминиевая пудра (ГОСТ 5494–95) для возможного получения муллитоподобных образований, обоснованность которых представлена в работах [1, 2, 3, 7]. Как основной сырьевой компонент была применена глина, химический состав которой представлен следующими оксидами, %: SiO<sub>2</sub> – 66,44; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 12,75; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4,36; CaO – 6,25; MgO – 1,4; п.п.п. – 6,92.

Таблица 1

#### Состав и основные характеристики фторангидрита

Table 1

#### Fluorine anhydrite composition and properties

Температура ФТА на выходе из печи, °С	Химический состав ФТА, масс. %					Гранулометрический состав, частные остатки на ситах, %					Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>
	CaSO <sub>4</sub> <sup>p</sup>	CaSO <sub>4</sub> <sup>h</sup>	CaF <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HF	2,5--5	1,25--2,5	0,63--1,25	0,315--0,63	0,16--0,315		
160	15	78,75	1,15	5,5	0,1	16,7	11,7	6,2	36,2	39,2	2570	1470

Исследование фазового состава и структурных параметров образцов проводилось на дифрактометре XRD-6000 (Shimadzu, Япония). Выбор способа подготовки шихты обоснован степенью формуемости керамической массы. Так, штучные изделия получали полусухим и шликерным способами, а зернистые – пластическим. В лабораторных условиях глину подсушивали до постоянной массы, измельчали в щековой дробилке с последующим помолотом в шаровой мельнице совместно с кислым фторангидритом в расчетных соотношениях. В работе использована двухфракционная шихта фракций 1,25 и 0,63 мм. Обжиг высушенных образцов происходил в лабораторной муфельной печи при соответствующих температурах. Общая продолжительность обжига составила 20–24 ч, в том числе подъем температуры до максимальной – 12 ч, выдержка при максимальной температуре – 2–4 ч. Оптимальную температуру обжига подбирали опытным путем по показателям прочности образцов при сжатии

и средней плотности. Обжиг полученных изделий осуществлялся в диапазоне температур, соответствующих производству керамических материалов, и составил 900–1000 °С.

### Результаты исследований

Керамзитовый гравий изготавливают по пластическому и сухому способам. Для производства зернистых теплоизоляционных материалов с использованием фторангидрита в наибольшей степени подходит пластический способ, при котором допускается применение глин более распространенных разновидностей и имеется возможность вводить в глину различные добавки.

Сущность процесса производства керамзитового гравия заключается в ускоренном нагревании глинистых пород до пиропластического состояния (до размягчения) с одновременным образованием и выделением в обжигаемом материале газообразных продуктов, вспучивающих гранулы. При нагреве глинистых пород происходят процессы, исследованные в работах [1, 2, 3, 4]: удаление свободной и физически связанной воды (100–150 °С), химически связанной воды (300–800 °С); диссоциация карбонатов с выделением свободной CO<sub>2</sub> (600–950 °С); диссоциация сульфатов и сульфидов с выделением SO<sub>2</sub> (550–1000 °С); выгорание углерода (900–1000 °С); восстановление оксидов железа с высвобождением газообразных продуктов (выше 1000 °С); разложение глинистых минералов (700–900 °С); разложение минералов магматических пород с выделением конституционной воды (400–800 °С); одновременно происходит размягчение материала и появление жидкой фазы (эвтектических расплавов).

Фторангидрит как компонент шихты обеспечивает минимальную обжиговую усадку изделий, ускоряет реакции силикатообразования, при этом фторид кальция, являясь хорошим плавнем, в сочетании с ангидритом снижает его температуру плавления.

При производстве зернистых теплоизоляционных материалов с использованием фторангидрита можно обоснованно остановить выбор на пластическом способе, поскольку он допускает применение глин более распространенных разновидностей и дает возможность вводить в них различные добавки. При данном способе, как отмечено ранее, образуется удобоформуемая масса. Результаты обжига зернистых материалов представлены в табл. 2.

Таблица 2

### Физико-механические характеристики обжиговых зернистых материалов

Table 2

#### Physical and mechanical properties of granular fired ceramics

№ состава	Содержание компонентов, %				$\rho_m$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_{сж}$ , МПа	W, %
	Глина	ФТА	Жидкое стекло	Вода			
1	41,6	41,6	16,8	–	1200	17	20
2	40	40	–	20	1250	10,5	18
3	40	40	10	10	1150	14	23

Из экспериментальных данных следует, что полученные обжиговые зернистые материалы имеют среднюю плотность 1150–1200 кг/м<sup>3</sup>, прочность на сжатие – 14–17 МПа, что по основным физико-механическим характеристикам не уступает керамзиту. Рентгенофазовый анализ обожженного образца (рис. 1) с добавками показал наличие кристаллических фаз нерастворимого ангидрита CaSO<sub>4</sub> II с *d*, Å (3,50; 2,85), фторида кальция CaF<sub>2</sub> с *d*, Å (1,94; 1,65), Na<sub>2</sub>O-2CaO-3SiO<sub>2</sub> с *d*, Å (2,63; 1,87). Дифракционные максимумы с *d*, Å (2,85; 2,18; 1,85; 1,73) соответствуют анортиту CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>. Образование геленита 2CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub> отмечено дифракционными максимумами с *d*, Å (3,06; 2,85; 2,47; 2,33; 1,94; 1,87; 1,51).

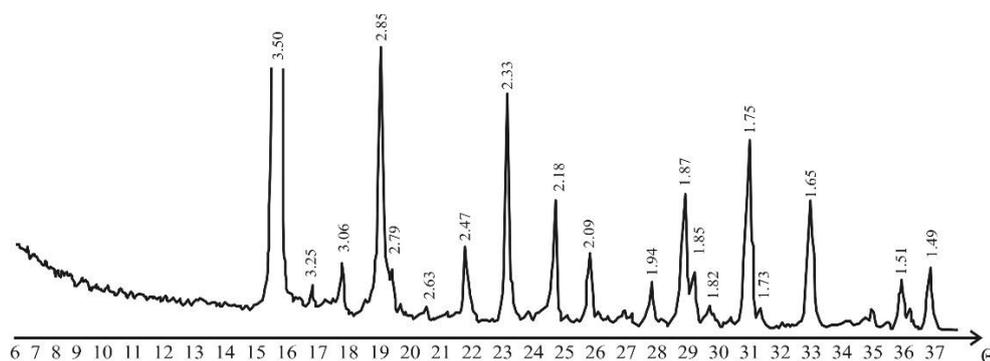


Рис. 1. Рентгенограмма керамического обжигового материала  
Fig. 1. XRD pattern of fired ceramic material

Структура зернистого керамического материала пористая, с включениями нерастворимого ангидрита.

В соответствии с технологической схемой производства шихта в лабораторных условиях готовилась следующим способом: глину подсушивали и измельчали в щековой дробилке, после чего осуществлялся ее помол совместно с кислым фторангидритом в требуемом соотношении. С добавлением жидкого стекла формировали гранулы требуемого диаметра. Обжиг материала происходил во вращающейся печи при температуре 1050 °С в течение 20 ч.

При выборе способа формования глиняной массы для производства штучных керамических материалов исходили из полученных характеристик формовочной массы, сопровождающей технологии производства керамических изделий: пластический, шликерный, способ полусухого прессования.

Пористая структура керамического зернистого материала представлена на рис. 2.

Выбор способа производства определяется карьерной влажностью и плотностью сырья, чувствительностью его к сушке, а также зависит от предполагаемого ассортимента продукции. Шликерный способ обладает серьезными достоинствами: он является наиболее универсальным и позволяет использовать глины с более широким диапазоном свойств.

По результатам предварительных экспериментов наиболее удобоформируемая масса получена при полусухом способе формования.

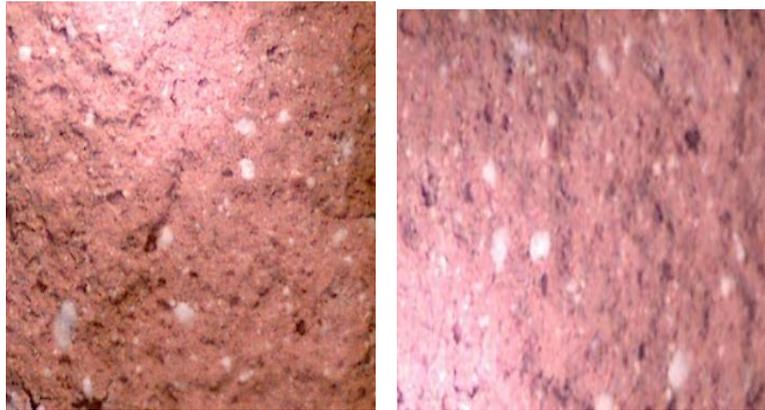


Рис. 2. Структура керамического зернистого материала  
Fig. 2. Structure of granular ceramic material

Подбор состава стеновой керамики осуществлялся способом полусухого формования. При этом соотношение глины и фторангидрита подбиралось экспериментально. Температура обжига составляла 950 °С, давление формования образцов – 25 МПа. Составы и физико-механические характеристики керамических штучных материалов с добавкой фторангидрита, полученных способами полусухого прессования, представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Физико-механические характеристики  
обжиговых керамических материалов**

Table 3

**Physical and mechanical properties of fired ceramics**

№ состава	Содержание компонентов, %				$\rho_m$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_{сж}$ , МПа
	Глина	ФТА, фракция, мм	Зола	Вода		
1	46,2	18,5(1,25)	27,7	7,6	1830	12,6
2	46,2	18,5(0,63)	27,7	7,6	1800	11,8
3	–	92	–	8	1950	1,2

По результатам испытаний образцов установлено, что полусухим способом прессования с использованием фторангидрита в количестве 18,5 % можно получать керамический кирпич со средней плотностью 1800–1830 кг/м<sup>3</sup> и прочностью 11,8–12,6 МПа. Прочность образцов, полученных спеканием фторангидрита, минимальна. По результатам проведенных исследований разработана технологическая схема производства керамических материалов.

Технологический процесс получения штучных керамических материалов методом полусухого прессования включает стандартные технологические переделы: переработку и хранение глинистого сырья и добавок; приготовление пресс-порошка; хранение пресс-порошка; полусухое прессование пресс-порошка под давлением 20–25 МПа; сушку и обжиг кирпича-сырца; приемку, упаковку, складирование.

### Заключение

Результаты исследований показали, что полученные обжиговые зернистые материалы обладают высокими прочностными и теплоизоляционными свойствами, имеют среднюю плотность 1150–1200 кг/м<sup>3</sup>, прочность на сжатие 14–17 МПа, что по основным физико-механическим характеристикам не уступает керамзиту.

По результатам испытаний образцов установлено, что полусухим способом прессования с использованием фторангидрита в количестве 18,5 % можно получать стеновую керамику со средней плотностью 1800–1830 кг/м<sup>3</sup> и прочностью 11,8–12,6 МПа, что дает возможность изготавливать керамические материалы с требуемыми свойствами, при этом экономить природное сырье и утилизировать вторичное ангидритовое сырье.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Скрипникова Н.К., Юрьев И.Ю. Комплексное использование золошлаковых отходов Томской области для получения различных видов строительных материалов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 2 (39). С. 245–249.
2. Власов В.А., Семеновых М.А., Скрипникова Н.К., Шеховцов В.В. Особенности использования некондиционных видов сырья для получения анортитовой керамики // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. № 22 (5). С. 122–128.
3. Скрипникова Н.К., Юрьев И.Ю. Строительные керамические изделия на основе микродисперсных золошлаковых соединений // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 4 (33). С.127–131.
4. Канаев В.К. Новая технология строительной керамики. Москва : Стройиздат, 1990. 264 с.
5. Яковлев Г.И., Кодолов В.И. Жидкофазное спекание фторангидрита при синтезе гипсокерамических материалов // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 1999. Т. 42 (1). С. 97–100.
6. Яковлев Г.И. Керамический материал на основе фторангидрита // Стекло и керамика. 2002. Т. 75. № 9. С.18–19.
7. Верещагин В.И., Бурученко А.Е., Кащук И.В. Возможность использования вторичного сырья для получения строительной керамики и ситаллов // Строительные материалы. 2000. № 7. С. 20–23.
8. Аниканова Л.А. Использование вторичного гипсосодержащего сырья для производства строительных материалов // Материалы VII Международной научно-практической конференции, 14–16 марта 2017 г. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2017. С. 31–34.
9. Аниканова Л.А., Курмангалиева А.И., Пискарева А.Т., Казанцева В.С. Водостойкие стеновые материалы с использованием ангидритовых вяжущих // Материалы VI Международной научно-практической конференции. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2016. С. 124–127.
10. Патент № 0002653192 Российская Федерация, МПК С04В 38/02 (2006.01), С04В 28/14 (2006.01). Конструкционно-теплоизоляционный материал : № 2017110628 : заявл. 29.03.2017 : опубл. 07.05.2018 / Аниканова Л.А., Курмангалиева А.И., Кудяков А.И., Саркисов Ю.С., Волкова О.В. 3 с.
11. Завадская Л.В. Газогипсовые материалы с армирующими волокнистыми добавками : специальность 05.23.05 «Строительные материалы и изделия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск, 2011. 154 с.
12. Сулимова Е.В., Лapidус М.А., Гаркави М.С. Вопросы твердения ангидритовых вяжущих // Строительные материалы. 1993. № 7. С. 12–17.
13. Аниканова Л.А., Волкова О.В., Курмангалиева А.И., Волков К.С. Исследование фторангидритового сырья для получения композиционных вяжущих // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 4. С. 160–170.

14. Аниканова Л.А., Кудяков А.И., Никитина О.В. Влияние полимерсиликатной жидкости на водостойкость композиционных фторангидридных вяжущих // Материалы Веймарской гипсовой конференции. Веймар, 26–27 марта 2014 г. С. 183–190.

## REFERENCES

1. Skripnikova N.K., Yur'ev I.Yu. Integrated use of ash and slag waste from the Tomsk region for building material production. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013; 39 (2): 245–249. (In Russian)
2. Vlasov V.A., Semenovych M.A., Skripnikova N.K., Shekhovtsov V.V. Non-standard raw materials for anorthite ceramics production. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Arkhitekturno-Stroitel'nogo Universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020; 22 (5): 122–128. (In Russian)
3. Skripnikova N.K., Yur'ev I.Yu. Constructional ceramic products based on microdispersed bottom ash compositions. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2011; 33 (4): 127–131. (In Russian)
4. Kanaev V.K. New technology of building ceramics. Moscow: Stroizdat, 1990. 264 p. (In Russian)
5. Yakovlev G.I., Kodolov V.I. Liquid-phase sintering of acid fluoride in synthesis of gypsum-ceramic materials. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 1999; 42 (1): 97–101. (In Russian)
6. Yakovlev G.I. Acid fluoride-based ceramic material. *Steklo i keramika*. 2002; 75 (9): 18–19. (In Russian)
7. Vereshchagin V.I., Buruchenko A.E., Kashchuk I.V. Possibility of using recycled materials in building ceramics and glass ceramics production. *Stroitel'nye materialy*. 2000; (7): 20–23. (In Russian)
8. Anikanova L.A. Recycled gypsum raw materials for building material production. In: *Proc. 7th Int. Sci. Conf.*, Tomsk, 2017. Pp. 31–34. (In Russian)
9. Anikanova L.A., Kurmangalieva A.I., Piskareva A.T., Kazantseva V.S. Waterproof wall materials with anhydrite binders. In: *Proc. 7th Int. Sci. Conf.*, Tomsk, 2016. Pp. 124–127. (In Russian)
10. Anikanova L.A., Kurmangalieva A.I., Kudjakov A.I., Sarkisov Ju.S., Volkova O.V. Load-bearing structural insulating material. RF Patent N 2653192. 2018. 4 p. (In Russian)
11. Zavadskaja L.V. Gas-gypsum materials with reinforcing fiber additives. PhD Thesis. Novosibirsk, 2011. 17 p. (In Russian)
12. Sulimova E.V., Lapidus M.A., Garkavi M.S. Issues of anhydrite binder hardening. *Stroitel'nye materialy*. 1993; (7): 12–17. (In Russian)
13. Anikanova L.A., Volkova O.V., Kurmangalieva A.I., Volkov K.S. A study of gypsum raw materials for composite binder production. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015; (4): 160–169. (In Russian)
14. Anikanova L.A., Kudjakov A.I., Nikitina O.V. Influence of polymersilicate liquid on water resistance of composite anhydrite binders. In: *Proc. Weimar Gypsum Conference*, Weimar, 2014. Pp. 183–190.

## Сведения об авторе

Аниканова Любовь Александровна, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная 2, alasmit@mail.ru

## Author Details

Ljubov' A. Anikanova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, alasmit@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.02.2024  
 Одобрена после рецензирования 11.03.2024  
 Принята к публикации 12.03.2024

Submitted for publication 28.02.2024  
 Approved after review 11.03.2024  
 Accepted for publication 12.03.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 2. С. 157–170.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (2): 157–170.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 536:21:674.038:699.86

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-157-170

EDN: NPQPJX

# ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ПРОФИЛИРОВАННОГО ДЕРЕВЯННОГО БРУСА С ТОРФОВЕРМИКУЛИТОВЫМ УТЕПЛИТЕЛЕМ

Николай Александрович Цветков<sup>1</sup>, Александр Витальевич Толстых<sup>1</sup>,  
Наталья Олеговна Копаница<sup>1</sup>, Дмитрий Николаевич Цветков<sup>2</sup>,  
Юлия Николаевна Дорошенко<sup>1</sup>, Динара Сергеевна Горкольева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Томский Губернаторский колледж культуры и искусств, г. Томск, Россия

**Аннотация.** Актуальность. На сегодняшний день все более важным становится использование экологически чистых материалов. Возведение энергосберегающих зданий с ограждающими конструкциями из утепленного профилированного бруса является одним из наиболее перспективных направлений в малоэтажном строительстве.

К материалам, оказывающим минимальное негативное воздействие на окружающую среду в течение всего периода эксплуатации, относятся новые строительные утеплители, созданные на основе торфOVERМИКУЛИТОВЫХ гранул.

**Цель работы** – исследование основных теплофизических характеристик деревянных наружных стен из профилированного бруса, в которых в качестве утеплителя используется торфOVERМИКУЛИТОВЫЙ материал, коэффициент теплопроводности которого может изменяться в диапазоне от 0,05 до 0,06 Вт/(м·К). Для этого было проведено численное моделирование тепломассопереноса в деревянных ограждающих конструкциях, выполненных из утепленного бруса с тремя различными вариантами коннекторов.

**В результате** моделирования стационарных процессов теплопроводности в брусевых конструкциях получены данные по пространственному распределению температур и потоков тепла. Показано, что использование фанерных коннекторов практически не влияет на распределение температуры по толщине деревянных стен с торфOVERМИКУЛИТОВОЙ изоляцией. Увеличение теплопроводности изоляции (в пределах типичного диапазона значений для торфOVERМИКУЛИТОВОГО материала) не оказывает заметного влияния на перепад температур вдоль оси коннектора или за пределами зоны его температурного влияния.

**Выводы.** Установлено, что толщина торфOVERМИКУЛИТОВОГО слоя утеплителя должна составлять не менее 0,176 м, чтобы обеспечить соблюдение основных требований к теплозащитным свойствам ограждающих конструкций в климатических условиях г. Томска. Наибольшие тепловые потери при минимальной толщине утеплителя будут в стене из профилированного утепленного бруса с Т-образным креплением коннекторов. Высокопрочный брус с дополнительной центральной ламелью обладает наилучшими теплозащитными характеристиками при минимально возможной толщине утеплителя.

**Ключевые слова:** торфOVERМИКУЛИТОВЫЙ утеплитель, утепленный профилированный брус, деревянные ламели, коннекторы из фанеры, теплоперенос, теп-

лопроводность, тепловой поток, плотность теплового потока, сопротивление теплопередаче, минимальная толщина слоя утеплителя

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0003.

**Для цитирования:** Цветков Н.А., Толстых А.В., Копаница Н.О., Цветков Д.Н., Дорошенко Ю.Н., Горколыцева Д.С. Теплозащитные свойства профилированного деревянного бруса с торфовермикулитовым утеплителем // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 157–170. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-157-170. EDN: NPQPJX

## ORIGINAL ARTICLE

### THERMAL PROTECTION PROPERTIES OF PROFILED TIMBER WITH PEAT-VERMICULITE INSULATION

Nikolai A. Tsvetkov<sup>1</sup>, Aleksandr V. Tolstykh<sup>1</sup>, Natalia O. Kopanitsa<sup>1</sup>, Dmitry N. Tsvetkov<sup>2</sup>, Yuliya N. Doroshenko<sup>1</sup>, Dinara S. Gorkoltseva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Tomsk Governor's College of Culture and Arts, Tomsk, Russia

**Abstract.** Today, the use of environmentally friendly materials is becoming increasingly important. The construction of energy-saving buildings with enclosing structures made of insulated profiled timber, is one of the most promising areas in low-rise construction.

Materials having minimum negative impact on the environment during their operation, include new construction insulation materials based on peat-vermiculite granules. The paper studies the main physical properties of wooden exterior walls made of profiled timber, in which peat vermiculite is used as insulation, thermal conductivity of which ranges from 0.05 to 0.06 W/(m·K). For this purpose, numerical simulation is performed for the heat-mass transfer in wooden enclosing structures made of insulated timber with three different connector options.

The temperature and heat flow distributions are obtained as a result of modeling stationary thermal conductivity processes in timber structures. It is shown that plywood connectors do not affect the thickness temperature distribution in wooden walls with peat-vermiculite insulation. An increase in thermal conductivity of insulation has no significant effect on the temperature difference along the connector axis or outside the region of its temperature influence.

It is found that the thickness of the peat-vermiculite insulation layer should be at least 0.176 m to ensure the compliance with the main requirements for thermal protection properties of enclosing structures in the climatic conditions of Tomsk. The greatest heat loss with a minimum insulation thickness is observed for the wall made of profiled insulated timber with T-shaped connectors. A high-strength timber with the additional central lamella has the best thermal protection with the lowest insulation thickness.

**Keywords:** peat-vermiculite insulation, insulated profiled timber, wooden slats, plywood connectors, heat transfer, thermal conductivity, heat flux, heat transfer resistance, thickness

**Funding.** This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project FEMN-2022-0003).

**For citation:** Tsvetkov N.A., Tolstykh A.V., Kopanitsa N.O., Tsvetkov D.N., Doroshenko Yu.N., Gorkoltseva D.S. Thermal protection properties of profiled timber with peat-vermiculite insulation. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 157–170. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-157-170. EDN: NPQPJX

## Введение

В настоящее время возрастает важность использования экологически чистых материалов для улучшения здоровья и благосостояния людей, получения доступной и экологически чистой энергии, смягчения последствий изменения климата, защиты лесов и других экосистем [1]. Внедряя экологически чистые материалы в промышленности и строительстве, можно добиться устойчивого индустриального развития без ухудшения состояния окружающей среды [2].

Наиболее перспективным решением в малоэтажном строительстве является применение энергоберегающих конструкций на основе клееного бруса [3, 4]. Подобные ограждающие конструкции обеспечивают высокую энергоэффективность двухэтажных домов даже в экстремальных климатических условиях [5]. Использование утепленного бруса приводит к уменьшению расхода материальных и финансовых ресурсов при строительстве и эксплуатации деревянных домов [6]. В работе [7] отмечено, что ограждающие конструкции на основе клееного утепленного бруса наиболее экономически выгодны.

При долгосрочной эксплуатации конструкций из утепленного бруса для предотвращения проблем, связанных с эксплуатационной надежностью, необходимо с помощью натурального или компьютерного моделирования тепло- и влагопереноса прогнозировать изменение теплозащитных свойств утеплителя, связанное, например, с накоплением влаги [8]. В работе [9] с использованием новой физико-математической модели были рассчитаны потоки тепла и влаги в неоднородных фрагментах брусковых стен, в которых в качестве утеплителя применялся пенополистирол. Краткосрочные оценки по накоплению влаги в аналогичных брусковых конструкциях с коннекторами даны в статье [10]. Исследование тепловлагопереноса в сложносоставных конструкциях с деревянными элементами также весьма актуально в настоящее время. Авторы работ [11, 12] рассматривают тепловые и влажностные режимы в частично изолированных деревянных частях зданий с целью оценки их влияния на надежность этих конструкций.

Следует отметить, что все большее значение приобретают так называемые устойчивые, или экологически безвредные, материалы, которые оказывают минимальное негативное воздействие на окружающую среду на протяжении всего жизненного цикла. К таким материалам можно отнести, например, льняные строительные утеплители, обладающие экологичностью и хорошими теплоизоляционными свойствами [13]. Другой, не менее экологичный материал, позволяющий использовать ресурсы Сибирского региона [14] при производстве строительных утеплителей, – это торфовермикулитовые гранулы. Торфовермикулитовые материалы обладают не только хорошими теплозащитными и антисептическими свойствами, но и невысокой стоимостью [15]. Целью настоящей работы является исследование теплозащитных свойств наружных стен малоэтажных зданий, выполненных из утепленного бруса с коннекторами, в котором используется торфовермикулитовый утеплитель.

Увеличение энергоэффективности наружных ограждений зданий и сооружений может привести не только к экономному потреблению теплоэнерге-

тических ресурсов, но и к повышению уровня комфорта в помещениях. В российской энергетике с последствиями неэффективного использования энергоресурсов сталкиваются ежедневно. Основные тепловые потери происходят из-за изношенности тепловых сетей, отсутствия современного оборудования, способного автоматизировать подачу тепловой энергии, и устаревших конструктивных материалов ограждающих конструкций [4].

### Материалы и методы исследования

Тепломассоперенос моделировался в характерных фрагментах брусковых стен (рис. 1), размеры которых первоначально были приняты  $0,225 \times 0,3 \times 0,23$  м. Подробно основные размеры и геометрические характеристики расчетных фрагментов брусковых стен представлены в работе [16].

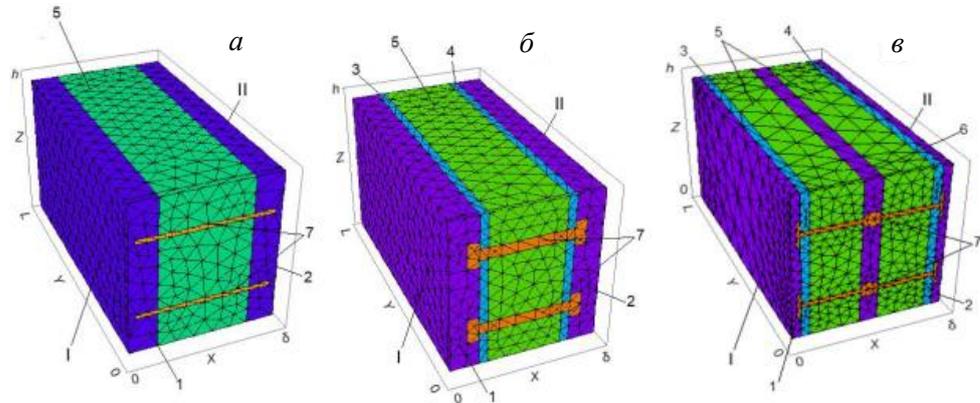


Рис. 1. Схемы конструкций утепленного профилированного бруса:

*a* – брус с простыми коннекторами; *б* – брус с Т-образным креплением коннекторов; *в* – брус с дополнительной внутренней ламелью; 1, 2 – наружная деревянная ламель; 3, 4 – фанерная прокладка; 5 – утеплитель; 6 – дополнительная внутренняя ламель; 7 – коннектор; I – поверхность контакта с наружным воздухом; II – поверхность контакта с внутренним воздухом; *h*, *l*, *δ* – размеры фрагмента бруса вдоль координат *z*, *x*, *y* соответственно

Fig. 1. FEM of insulated profiled timber:

*a* – simple connectors; *b* – T-shaped mounting of connectors; *c* – additional internal lamella; 1, 2 – outer wooden lamella; 3, 4 – plywood pad; 5 – insulation; 6 – additional inner lamella; 7 – connector; I – external air contact surface; II – internal air contact surface; *h*, *l*, *δ* – beam fragment dimensions along *z*, *x*, *y* coordinates

Для утепления брусковых стен предполагается использовать торфовермикулитовый материал, коэффициент теплопроводности которого может изменяться в диапазоне от 0,05 до 0,06 Вт/(м·К). Суммарная толщина слоев торфовермикулитового утеплителя принималась 0,11–0,187 м (в базовом варианте расчета).

Температура внутреннего воздуха со стороны поверхности II (рис. 1) составляет +20 °С, температура наружного воздуха со стороны плоскости I (рис. 1) составляет –39 °С (расчетная температура для г. Томска). Коэффициент теплопередачи составляет 23 Вт/(м<sup>2</sup>·К) на поверхности I и 8,7 Вт/(м<sup>2</sup>·К) на поверхности II.

Для определения температурных режимов при эксплуатации ограждений из утепленного бруса повышенной прочности с торфовермикулитовым утеплителем были рассчитаны трехмерные стационарные температурные поля. Была численно решена сопряженная задача [16], включающая несколько стационарных трехмерных уравнений теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями.

### Результаты исследования

Первый вариант расчета выполнялся при одинаковой толщине брусковых стен 0,23 м для всех рассматриваемых конструкций (рис. 1).

Температурные режимы в расчетных фрагментах различных конструкций бруса можно охарактеризовать графиками, представленными на рис. 2.

На рис. 2 показано распределение температуры  $t$  (по толщине стены) на оси коннектора (линия 1) и вне зоны его влияния в вертикальной (линия 2) и горизонтальной (линия 3) плоскостях, которые проходят через ось коннектора (при теплопроводности утеплителя 0,055 Вт/(м·К)).

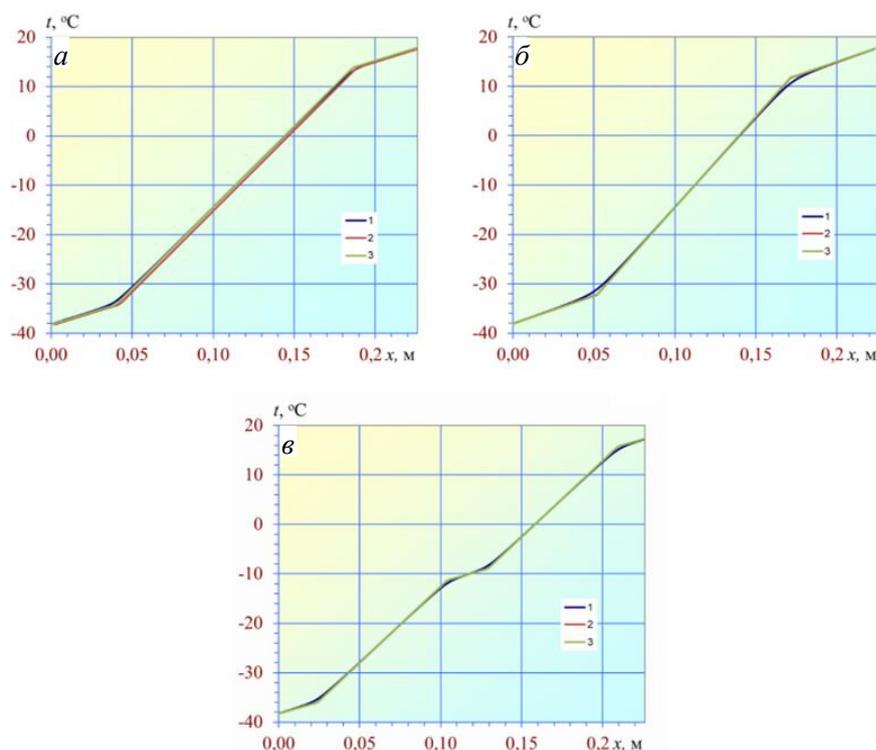


Рис. 2. Распределение температуры по толщине брусковой стены:

*a* – брус с простыми коннекторами; *b* – брус с Т-образным креплением коннекторов; *c* – брус с дополнительной внутренней ламелью

Fig. 2. Thickness temperature distribution in timber wall:

*a* – simple connectors; *b* – T-shaped mounting connectors; *c* – additional inner lamella

Из данных рис. 2 следует, что добавление в конструкцию коннектора из фанеры не приводит к существенному изменению распределения температуры

по толщине брусовой стенки. Например, температура на внутренней поверхности стен, средняя для трех рассмотренных конструкций утепленного бруса, при  $z = 3h/4$ ,  $y = 0,25$  (вне зоны влияния коннектора, линия 3) составляет  $17,84\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В тех же условиях для точки, расположенной на пересечении оси коннектора (линия 1) с внутренней поверхностью стены, температура –  $17,82\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Температурные профили для всех выбранных зон контроля, показанные на рис. 2, отличаются весьма незначительно. Максимальное отличие температур, осредненное для всех рассмотренных конструкций брусовой стены, на оси коннектора и в зонах, где влияние коннектора отсутствует, не превышает 9 %. Температурный профиль в брус с внутренней продольной ламелью имеет два дополнительных излома в местах контакта этой ламели со слоями утеплителя.

Зависимость плотности теплового потока от координаты  $x$  на оси симметрии коннектора в конструкции с внутренней продольной ламелью (рис. 3, в) имеет максимумы, которые расположены по центру двух слоев утеплителя, контактирующих с внутренней и наружными ламелями. В других конструкциях бруса (рис. 3, а, б) максимум теплового потока находится в центральном сечении стены.

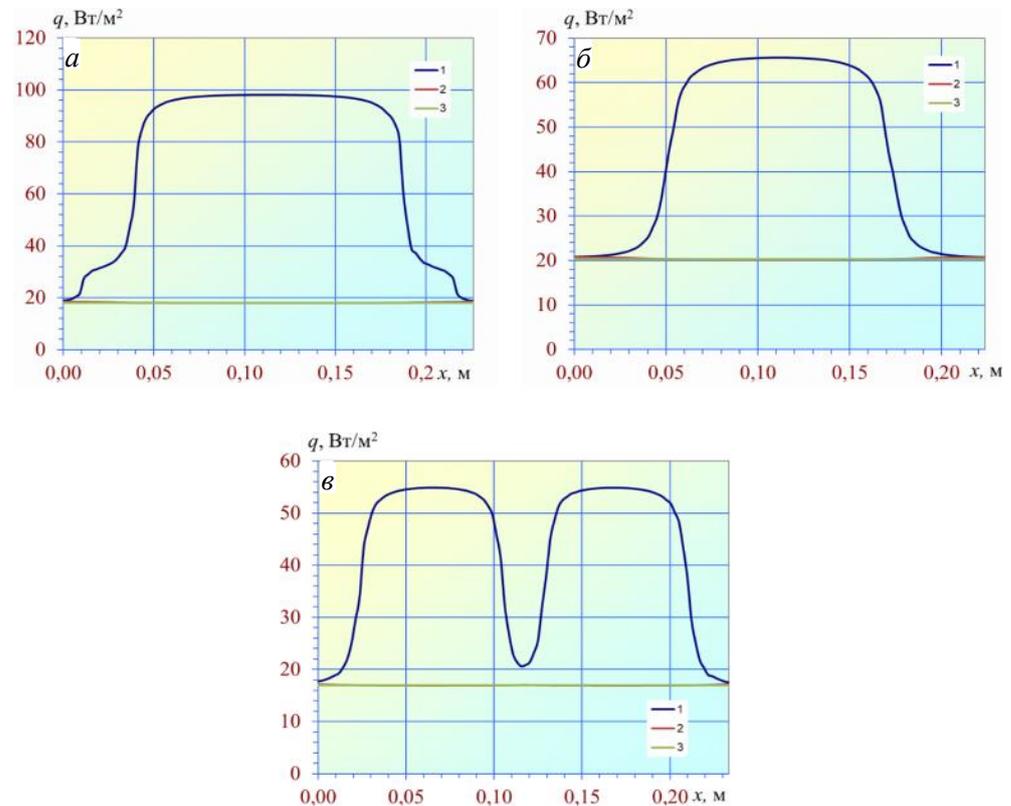


Рис. 3. Распределение плотностей теплового потока по толщине брусовой стены:  
 а – брус с простыми коннекторами; б – брус с Т-образным креплением коннекторов; в – брус с дополнительной внутренней ламелью

Fig. 3. Heat flux distribution along timber wall thickness:  
 а – simple connectors; б – T-shaped mounting connectors; в – additional inner lamella

Распределение абсолютной величины плотности теплового потока на оси коннектора (линия 1) по координате  $x$  и в зонах, удаленных от оси коннектора (линии 2, 3), представленное на рис. 3, показывает, что значения плотностей тепловых потоков на внутренней и наружной поверхностях для всех рассмотренных конструкций бруса (рис. 1) практически одинаковы как в точках присоединения коннекторов (линия 1), так и вне зоны их влияния (линии 2, 3). Однако эти же величины несколько отличаются для трех различных конструкций утепленного бруса (рис. 1): 18,72; 20,75 и 17,48 Вт/м<sup>2</sup> соответственно. Наибольшая интенсивность теплопередачи наблюдается в брус с Т-образным креплением коннекторов (рис. 1, б), при этом удельный тепловой поток на внутренней и наружной поверхностях стены составляет 20,75 Вт/м<sup>2</sup>. Наименьший тепловой поток на этих же поверхностях в точках на оси коннектора будет в конструкции стены с дополнительной внутренней продольной ламелью (рис. 1, в) – 17,48 Вт/м<sup>2</sup>.

Исходя из результатов расчета температурных полей (при теплопроводности торфOVERМИКУЛИТОВОЙ изоляции 0,055 Вт/(м·К)), были получены следующие значения тепловых (интегральных) потоков по поверхности стены: для конструкции с дополнительной внутренней ламелью  $Q_{\text{л}} = 1,147$  Вт, в случае использования простых коннекторов  $Q_{\text{п}} = 1,226$  Вт и  $Q_{\text{т}} = 1,377$  Вт для бруса с Т-образным креплением коннекторов. Приведем рассчитанные по представленным выше тепловым потокам сопротивления теплопередаче ( $R$ ) и коэффициенты тепловой однородности ( $r$ ):  $R_{\text{л}} = 3,47$  м<sup>2</sup>·К/Вт,  $r_{\text{л}} = 0,464$ ;  $R_{\text{п}} = 3,25$  м<sup>2</sup>·К/Вт,  $r_{\text{п}} = 0,394$ ;  $R_{\text{т}} = 2,89$  м<sup>2</sup>·К/Вт,  $r_{\text{т}} = 0,317$ .

В жилых зданиях требуемое (нормируемое) сопротивление теплопередаче наружных стен для г. Томска составляет 3,68 м<sup>2</sup>·К/Вт. Таким образом, не одна из брусовых конструкций не удовлетворяет основному требованию по тепловой защите зданий. Данный теплотехнический расчет выполнялся для конструкций бруса, которые по своим геометрическим характеристикам сходны с конструкциями бруса, описанными в работе [16]. В исследовании [16] применялся утеплитель с коэффициентом теплопроводности 0,033 Вт/(м·К), а теплопроводность торфOVERМИКУЛИТОВОГО утеплителя принималась равной 0,05–0,06 Вт/(м·К). Выполненные расчеты показывают, что при использовании торфOVERМИКУЛИТОВОГО утеплителя необходимо увеличить толщину стенки во всех рассматриваемых конструкциях брусовых стен.

Плотность теплового потока (рис. 4) при увеличении толщины утеплителя на 0,05–0,06 м падает по закону, близкому к линейному.

При теплопроводности утеплителя 0,055 Вт/(м·К):

- для бруса с простыми коннекторами – от 18,16 до 14,21 Вт/м<sup>2</sup>;
- для бруса с Т-образным креплением коннекторов – от 20,4 до 15,56 Вт/м<sup>2</sup>;
- для бруса с дополнительной внутренней ламелью – от 16,99 до 13,48 Вт/м<sup>2</sup>.

При теплопроводности утеплителя 0,06 Вт/(м·К):

- для бруса с простыми коннекторами – от 19,48 до 14,67 Вт/м<sup>2</sup>;
- для бруса с Т-образным креплением коннекторов – от 21,75 до 15,91 Вт/м<sup>2</sup>;
- для бруса с дополнительной внутренней ламелью – от 18,27 до 13,96 Вт/м<sup>2</sup>.

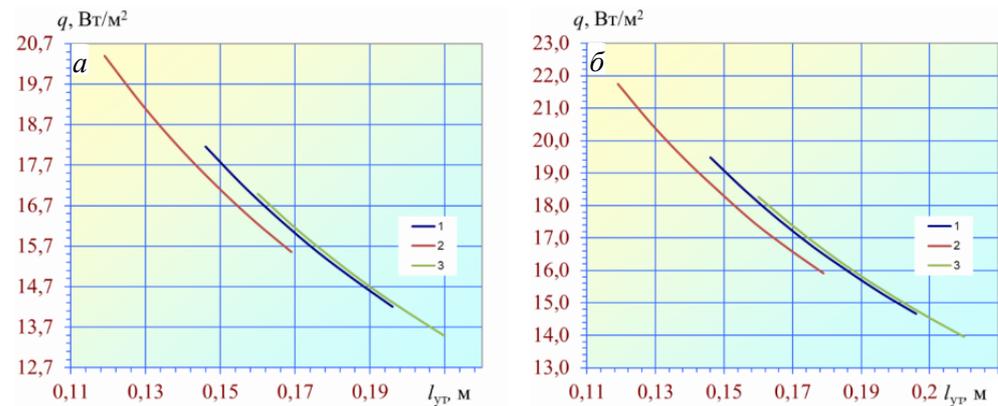


Рис. 4. Плотность теплового потока на внутренней и наружной поверхностях брусковых стен в зависимости от толщины утеплителя:

*a* – теплопроводность утеплителя – 0,055 Вт/(м·К); *б* – теплопроводность утеплителя – 0,06 Вт/(м·К); 1 – брус с простыми коннекторами; 2 – брус с Т-образным креплением коннекторов; 3 – брус с дополнительной внутренней ламелью

Fig. 4. Heat flux on the inner and outer surfaces of timber walls, depending on insulation thickness at different thermal conductivity:

*a* – 0.055 W/(m·K); *b* – 0.06 W/(m·K); 1 – simple connectors; 2 – T-shaped mounting connectors; 3 – additional internal lamellae

При сопоставимых толщинах утеплителя наибольшие значения плотности теплового потока (рис. 4, линия 3) на внутренней и наружной поверхностях стены устанавливаются при использовании конструкции с дополнительной внутренней ламелью (см. рис. 1, в).

На рис. 5 показано, как толщина утеплителя влияет на сопротивление брусковых стен теплопередаче. Наибольшие сопротивления теплопередаче при сопоставимых толщинах слоя утеплителя имеет конструкция утепленного бруса с Т-образным креплением коннекторов. Минимальная толщина слоя торфOVERМИКУЛИТОВОГО утеплителя, обеспечивающая требуемое сопротивление теплопередаче (для г. Томска), составляет:

- при теплопроводности утеплителя 0,055 Вт/(м·К):
- для бруса с простыми коннекторами – 0,17 м;
- для бруса с Т-образным креплением коннекторов – 0,164 м;
- для бруса с дополнительной внутренней ламелью – 0,172 м;
- при теплопроводности утеплителя 0,06 Вт/(м·К):
- для бруса с простыми коннекторами – 0,186 м;
- для бруса с Т-образным креплением коннекторов – 0,178 м;
- для бруса с дополнительной внутренней ламелью – 0,188 м.

Расчетом, проведенным при указанных ранее минимальных толщинах слоя утеплителя, установлено, что минимальная температура на внутренней поверхности брусковых стен составляет:

- при теплопроводности утеплителя 0,055 Вт/(м·К):
- для бруса с простыми коннекторами – 18,1 °С;
- для бруса с Т-образным креплением коннекторов – 18,13 °С;
- для бруса с дополнительной внутренней ламелью – 18,1 °С;

- при теплопроводности утеплителя 0,06 Вт/(м·К):
- для бруса с простыми коннекторами – 18,11 °С;
- для бруса с Т-образным креплением коннекторов – 18,13 °С;
- для бруса с дополнительной внутренней ламелью – 18,12 °С.

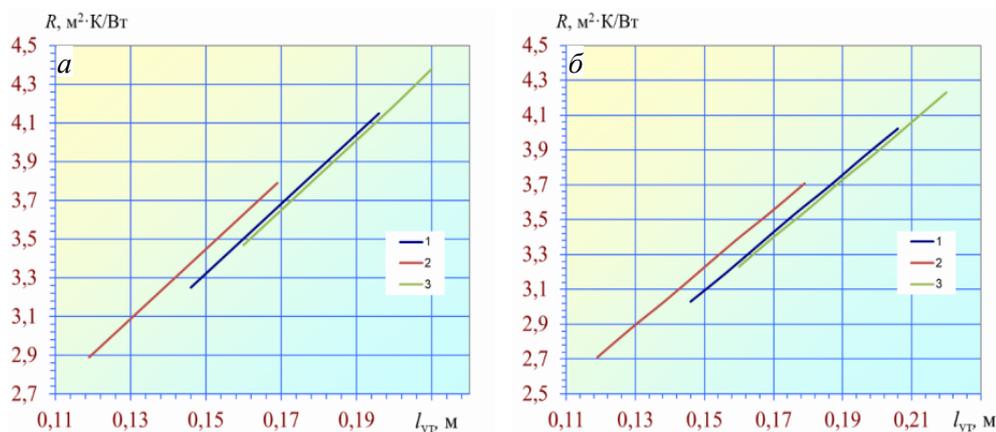


Рис. 5. Сопротивление теплопередаче брусковых стен в зависимости от толщины утеплителя: *a* – теплопроводность утеплителя – 0,055 Вт/(м·К); *б* – теплопроводность утеплителя – 0,06 Вт/(м·К); 1 – брус с простыми коннекторами; 2 – брус с Т-образным креплением коннекторов; 3 – брус с дополнительной внутренней ламелью

Fig. 5. Heat transfer resistance of timber walls depending on insulation thickness at different thermal conductivity: *a* – 0.055 W/(m·K); *b* – 0.06 W/(m·K); 1 – simple connectors; 2 – T-shaped mounting connectors; 3 – additional internal lamellae

Таким образом, перепад температуры на внутренней поверхности брусковых стен относительно температуры внутреннего воздуха 20 °С не превосходит 1,9 °С, и при полученной минимальной толщине теплоизоляции все рассмотренные брусковые конструкции удовлетворяют требованиям СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» (редакция 2022 г.) о том, что расчетный температурный перепад  $\Delta t_0$ , °С, между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции не должен превышать нормируемой величины для стен  $\Delta t_n = 4$  °С.

Рассмотрим далее влияние величины коэффициента теплопроводности торфовеермикулитового утеплителя в интервале 0,5–0,6 Вт/(м·К) на теплозащитные свойства брусковых стен в условиях г. Томска. Толщину утеплителя будем принимать минимальной, согласно определенным ранее значениям при максимальной теплопроводности утеплителя 0,06 Вт/(м·К).

Изменение теплопроводности торфовеермикулитового утеплителя в интервале 0,05–0,06 Вт/(м·К) практически не сказывается на температурных режимах, реализующихся на внутренней поверхности рассмотренных конструкций брусковых стен (рис. 6, *a*).

Абсолютное изменение минимальной температуры на внутренней поверхности брусковых стен, связанное с увеличением теплопроводности, не превосходит 0,4 °С.

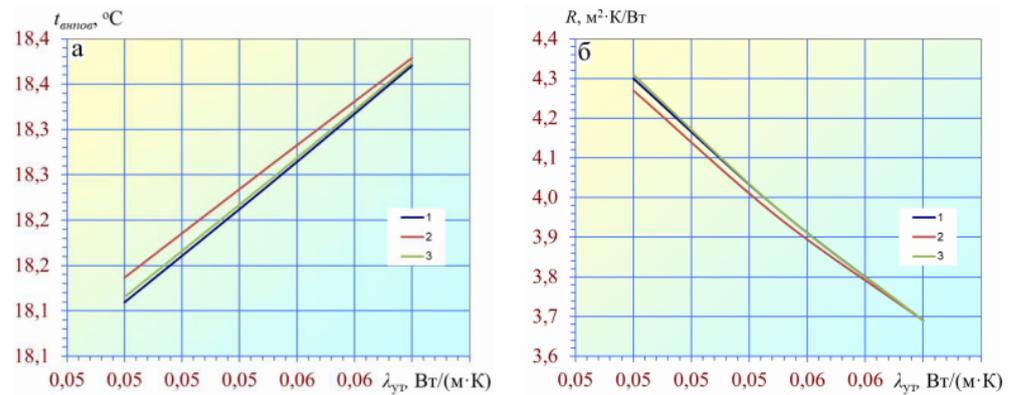


Рис. 6. Минимальная температура на внутренней поверхности брусковых стен и их сопротивление теплопередаче в зависимости от теплопроводности утеплителя (при минимально возможных толщинах утеплителя):

*a* – температура внутренней поверхности; *б* – сопротивление теплопередаче; 1 – брус с простыми коннекторами; 2 – брус с Т-образным креплением коннекторов; 3 – брус с дополнительной внутренней ламелью

Fig. 6. The minimum temperature on the inner surface of the timber walls and their resistance to heat transfer, depending on the thermal conductivity of the insulation (with the minimum possible thickness of the insulation):

*a* – temperature of the inner surface; *b* – resistance to heat transfer; 1 – timber with simple connectors; 2 – timber with T-shaped mounting connectors; 3 – timber with additional internal lamellae

С увеличением коэффициента теплопроводности торфовермикулитового утеплителя от 0,05 до 0,06 Вт/(м·К) сопротивление теплопередаче брусковых стен с коннекторами снижается в среднем в 1,16 раза (рис. 6, б). Наилучшими теплозащитными свойствами при минимально возможной толщине утеплителя обладает брусковая стена с дополнительной центральной ламелью (рис. 1, в), а минимальные термические сопротивления теплопередаче будут в стене из профилированного утепленного бруса с Т-образным креплением коннекторов.

### Заключение

Таким образом, в результате проведенного моделирования температурных режимов для трех вариантов конструкций клееного профилированного бруса установлено следующее:

– использование фанерных коннекторов практически не оказывает влияния на распределение температуры по толщине брусковых стен с торфовермикулитовым утеплителем;

– добавка дополнительной центральной ламели не приводит к существенному снижению температуры на внутренней поверхности бруса в месте присоединения коннектора;

– величины тепловых потоков на внутренней и наружной поверхностях для всех рассмотренных конструкций бруса практически совпадают в местах присоединения коннекторов и вне зоны их влияния, хотя в центральной области стен (на оси коннекторов) величины тепловых потоков в значительной степени определяются особенностями конструкций коннекторов;

– величины тепловых потоков на внутренней и наружной поверхностях для всех рассмотренных конструкций бруса при одинаковой толщине стен 0,23 м различны: минимальная интенсивность теплопередачи наблюдается для стены с дополнительной внутренней продольной ламелью, а максимальная интенсивность теплопередачи будет в расчетном фрагменте бруса с Т-образным креплением коннекторов;

– при сопоставимых толщинах утеплителя наиболее низкий тепловой поток и, соответственно, наибольшее сопротивление теплопередаче наблюдается в расчетном фрагменте утепленного бруса с Т-образным креплением коннекторов (без внутренней продольной ламели);

– минимальная толщина слоя торфоперемикулитового утеплителя, обеспечивающая выполнение базовых требований к теплозащитным свойствам ограждающих конструкций (в среднем для всех рассмотренных конструкций бруса), составляет 0,176 м;

– при минимальных толщинах слоя утеплителя минимальная температура на внутренней поверхности брусочных стен (в среднем для всех рассмотренных конструкций бруса) составляет 18,12 °С;

– наилучшие теплозащитные характеристики при минимально возможной толщине утеплителя имеет брус повышенной прочности с дополнительной центральной ламелью, а наибольшие теплотери при этих же условиях будут в стене из профилированного утепленного бруса с Т-образным креплением коннекторов.

Результаты моделирования важны для прогнозирования эксплуатационных характеристик новых конструкций прочного профилированного бруса с торфоперемикулитовой утепляющей вставкой.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Saura-Cayuela M., Lara-Torres S., Pacheco-Fernández I., et al.* Green materials for greener food sample preparation: A review // *Green Analytical Chemistry*. 2023. V. 4. P. 100053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2023.100053>
2. *Kore S.D., Balaji N., Sudarsan J.S.* Feasibility study of adopting green materials in construction by stake holder's perception using ANOVA based quantitative analysis technique // *Materials Today: Proceedings*. 2023. V. 92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.335>
3. *Копров Д.А., Розанцева Н.В.* Полнообъемные клеидеревянные конструкции как альтернативное решение при строительстве промышленных ангаров // *Технология строительного производства : материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции, посвященной 190-летию Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (ЛИСИ – СПбГАСУ), Санкт-Петербург, 28–29 апреля 2022 г.* Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. С. 151–157.
4. *Цветков Н.А., Хуторной А.Н., Толстых А.В., Колесникова А.В.* Физико-математическая модель теплового переноса в ограждающих конструкциях из профилированного теплового бруса // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2017. № 2 (698). С. 12–20.
5. *Огородников И.А., Бородулин В.Ю., Низовцев М.И.* Тепловой баланс дома с воздушным солнечным коллектором и аккумулятором тепла для условий Прибайкалья // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2022. № 12 (768). С. 49–63.
6. *Толстихина Е.Д., Арабли Л.А., Зенкова У.В.* Оценка возможности экономии энергии в деревянном доме // *Управление экономическими системами. Электронный научный журнал*. 2019. № 10 (128). С. 34–35.

7. Дубровина Ю.Ю., Цыбакин С.В. Техничко-экономическое сравнение вариантов конструкций стен индивидуальных жилых домов // Современная наука: актуальные вопросы и достижения в эпоху трансформационных процессов : сборник статей по материалам 74-й Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Каравасво, 26 января 2023 г. Каравасво : Костромская государственная сельскохозяйственная академия, 2023. С. 107–113.
8. Алиев С.А. Влагонакопление стеновой конструкции из дерева в десятилетнем цикле // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее : сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 40-летию создания Инженерно-строительного института, Красноярск, 19–21 октября 2022 г. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2022. С. 464–468.
9. Tsvetkov N.A., Tolstykh, A.V.Y., Khutornoi, A.N., et al. Mathematical modelling of renewable construction materials for green energy-efficient buildings at permafrost regions of Russia // Environmental Challenges. 2021. V. 4. P. 100101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100101>
10. Цветков Н.А., Толстых А.В., Цветков Д.Н., Дорошенко Ю.Н. Оценка возможности образования мокрых зон в ограждающих конструкциях из утепленного бруса с коннекторами // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 4 (760). С. 87–98. DOI: <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2022-760-4-87-98>
11. Wonjun Choi, Ryozo Ooka, Masanori Shukuya. Unsteady-state exergetic performance comparison of externally and internally insulated building envelopes // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. V. 163. P. 120414. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120414>
12. Xiaohai Zhou, Carmeliet J., Derome D. Assessment of moisture risk of wooden beam embedded in internally insulated masonry walls with 2D and 3D models // Building and Environment. 2021. V. 193. P. 107460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107460>
13. Шевцова М.А., Чернеев А.М., Безрук Г.В. Преимущество использования льняных теплоизоляционных плит в коттеджном строительстве // Перспективы науки. 2020. № 11 (134). С. 267–269.
14. Горколыцева Д.С., Копаница Н.О. ТорфOVERМИКУЛИТОВЫЕ смеси для производства теплоизоляционного гранулированного материала // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 5. С. 93–104.
15. Копаница Н.О., Ковалева М.А. Исследование вяжущих свойств низинных торфов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. Т. 36. № 3. С. 153–158.
16. Цветков Н.А., Хуторной А.Н., Толстых А.В., Дорошенко Ю.Н. Сравнительный анализ теплозащитных характеристик стен из профилированного утепленного бруса с коннекторами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 2. С. 124–136.

#### REFERENCES

1. Saura-Cayuela M., Lara-Torres S., Pacheco-Fernández I., et al. Green materials for greener food sample preparation: A review. *Green Analytical Chemistry*. 2023; 4: 100053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2023.100053>
2. Kore S.D., Balaji N., Sudarsan J.S. Feasibility study of adopting green materials in construction by stake holder's perception using ANOVA based quantitative analysis technique. *Materials Today: Proceedings*. 2023; 92: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.335>
3. Koprov D.A., Rozantseva N.V. Fully assembled clad-wood structures as an alternative solution for the construction of industrial hangars. In: *Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'Technology of Construction Production'*. Saint-Petersburg, 2022. Pp. 151–157. (In Russian)
4. Tsvetkov N.A., Khutornoj A.N., Tolstykh A.V., Kolesnikova A.V. A physical and mathematical model of heat and moisture transfer in enclosing structures made of profiled thermal timber. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2017; 698 (2): 12–20. (In Russian)

5. Ogorodnikov I.A., Borodulin V.Yu., Nizovtsev M.I. Thermal balance of house with air solar collector and heat accumulator in Baikal region conditions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2022; 768 (12): 49–63. (In Russian)
6. Tolstikhina E.D., Arabli L.A., Zenkova U.V. Assessment of saving energy in wooden house. *Upravlenie ekonomicheskimi sistemami*. 2019; 128 (10): 34–35. (In Russian)
7. Dubrovina Yu.Yu., Tsybakin S.V. Technical and economic comparison of wall designs of individual residential buildings. In: *Proc. 74th All-Russ. Sci. Conf. 'Modern Science: Current Issues and Achievements in the Era of Transformation Processes'*. Karavaevo: Kostroma State Agricultural Academy. 2023. Pp. 107–113. (In Russian)
8. Aliev S.A. Moisture accumulation of wooden wall structure in a ten-year cycle. In: *Proc. 74th All-Russ. Sci. Conf. 'Current Issues of Construction: Look Into The Future'*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2022. Pp. 464–468. (In Russian)
9. Tsvetkov N.A., Tolstykh A.V.Y., Khutornoi A.N., et al. Mathematical modelling of renewable construction materials for green energy-efficient buildings at permafrost regions of Russia. *Environmental Challenges*. 2021; 4: 100101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100101>
10. Tsvetkov N.A., Tolstykh A.V., Tsvetkov D.N., Doroshenko Yu.N. Wet zone formation in enclosing structures made of insulated timber with connectors. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2022; 760 (4): 87–98. DOI: <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2022-760-4-87-98>. (In Russian)
11. Wonjun Choi, Ryoza Ooka, Masanori Shukuya. Unsteady-state exergetic performance comparison of externally and internally insulated building envelopes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020; 163: 120414. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120414>
12. Xiaohai Zhou, Carmeliet J., Derome D. Assessment of moisture risk of wooden beam embedded in internally insulated masonry walls with 2D and 3D models. *Building and Environment*. 2021; 193: 107460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107460>
13. Shevtsova M.A., Cherneev A.M., Bezruk G.V. Advantage of linen thermal insulation boards in cottage construction. *Perspektivy nauki*. 2020; 134 (11): 267–269. (In Russian)
14. Gorkoltseva D.S., Kopanitsa N.O. Peat-vermiculite compositions for granulated material production. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23 (5): 93–104. (In Russian)
15. Kopanitsa N.O., Kovaleva M.A. Investigation of astringent properties of lowland peat. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012; 36 (3): 153–158. (In Russian)
16. Tsvetkov N.A., Khutornoi A.N., Tolstykh A.V., Doroshenko Yu.N. Comparative analysis of heat-insulating properties of walls made of profiled beams. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018; 20 (2): 124–136. (In Russian)

#### Сведения об авторах

Цветков Николай Александрович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [nac.tsuab@yandex.ru](mailto:nac.tsuab@yandex.ru)

Толстых Александр Витальевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [tolstbu@yandex.ru](mailto:tolstbu@yandex.ru)

Копаница Наталья Олеговна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [kopanitsa@mail.ru](mailto:kopanitsa@mail.ru)

Цветков Дмитрий Николаевич, преподаватель, Томский Губернаторский колледж культуры и искусств, 634009, г. Томск пр. Ленина, 125а, [orf@mail.ru](mailto:orf@mail.ru)

Дорошенко Юлия Николаевна, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [kafotopvent1@rambler.ru](mailto:kafotopvent1@rambler.ru)

*Горколыцева Динара Сергеевна*, ассистент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, gorkoltsevadina@gmail.com

#### **Authors Details**

*Nikolai A. Tsvetkov*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, nac.tsuab@yandex.ru

*Aleksandr V. Tolstykh*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, sinvintie@rambler.ru

*Natalia O. Kopanitsa*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kopanitsa@mail.ru

*Dmitry N. Tsvetkov*, Lecturer, Tomsk Governor's College of Culture and Arts, 125 a, Lenin Ave., 634009, Tomsk, Russia, orf@mail.ru

*Yuliya N. Doroshenko*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kafotopvent1@rambler.ru

*Dinara S. Gorkoltseva*, Assistant Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, gorkoltsevadina@gmail.com

#### **Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Authors contributions**

The authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.03.2024  
Одобрена после рецензирования 19.03.2024  
Принята к публикации 20.03.2024

Submitted for publication 09.03.2024  
Approved after review 19.03.2024  
Accepted for publication 20.03.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 2. С. 171–184.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (2): 171–184.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 666.32/.36:691.421:691.433

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-171-184

EDN: PUJLFN

# ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРАСНОГО ШЛАМА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ

Татьяна Викторовна Вакалова<sup>1</sup>, Николай Петрович Сергеев<sup>1</sup>,  
Диас Талгатович Толегенов<sup>2</sup>, Диана Жумабековна Толегенова<sup>1,2</sup>,  
Наталья Александровна Митина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Торайгыров университет, г. Павлодар, Республика Казахстан

**Аннотация.** Актуальность. Работа посвящена актуальной проблеме создания высокопрочных керамических материалов с использованием техногенных отходов.

Целью настоящей работы является исследование возможности получения керамических и композиционных структур с использованием отходов химико-металлургических производств для создания новых видов высококачественной строительной керамики.

Поставленная цель достигается применением в качестве основного сырьевого компонента тугоплавкой глины с добавками высокожелезистого бокситового шлама. Функции бокситового шлама в составе композиций с алюмосиликатным сырьем при температуре обжига от 1100 до 1200 °С сводятся к спекающему действию за счет собственного плавления при 1150 °С.

**Результаты.** Установлено, что композиции тугоплавкой глины с добавками красного шлама от 20 до 50 % при температуре обжига 1050 °С образуют керамические структуры с прочностью на сжатие, в 1,3–1,5 раза превышающей прочность образцов из исследуемой глины без добавки (91 и 122–132 МПа соответственно).

**Выводы.** Разработанные составы керамических масс с использованием красного шлама и установленные технологические режимы получения изделий определяют их перспективность для изготовления высокопрочной анортитовой и аноррито-геленитовой строительной керамики по полусухой технологии.

**Ключевые слова:** тугоплавкая глина, красный шлам, синтез, спекание, анортит, геленит, механическая прочность

**Для цитирования:** Вакалова Т.В., Сергеев Н.П., Толегенов Д.Т., Толегенова Д.Ж., Митина Н.А. Перспективы использования красного шлама для получения высокопрочной строительной керамики // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 171–184. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-171-184. EDN: PUJLFN

## ORIGINAL ARTICLE

## RED MUD IN HIGH-STRENGTH CERAMICS PRODUCTION

Tatyana V. Vakalova<sup>1</sup>, Nikolai P. Sergeev<sup>1</sup>, Dias T. Tolegenov<sup>2</sup>,  
Diana Zh. Tolegenova<sup>1,2</sup>, Natalia A. Mitina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Toraighyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan

**Abstract.** The work is devoted to the creation of high-strength ceramic materials with technogenic waste fillers.

**Purpose:** Investigation of the ceramic and composite production based on chemical and metallurgical wastes to create new types of high quality constructional ceramics.

**Methodology/approach:** The use of refractory clay with the addition of high-iron bauxite sludge as the main raw material. Bauxite sludge functions in compositions with aluminosilicate raw materials at burning at 1100 to 1200 °C, reduce to sintering due to its melting at 1150 °C.

**Research findings:** Refractory clay compositions with red mud in the amount of 20 to 50 % at the burning temperature of 1050 °C, provide the ceramic formation possessing the compressive strength 1.3 to 1.5 times higher than that of clay samples without additives, i.e., 91 and 122–132 MPa, respectively.

**Value:** The obtained ceramic compositions based on red mud determine a production of high-strength anorthite and anorthite-helenite ceramics using dry pressing.

**Keywords:** refractory clay, red mud, synthesis, sintering, anorthite, helenite, mechanical strength

**For citation:** Vakalova T.V., Sergeev N.P., Tolegenov D.T., Tolegenova D.Zh., Mitina N.A. Red mud in high-strength ceramics production. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 171–184. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-171-184. EDN: PUJLFN

## Введение

Интенсивное развитие производства современных керамических материалов, расширение их номенклатуры и ужесточение требований к их эксплуатационным свойствам сопровождаются активным потреблением высококачественного природного сырья, приводя к постепенному истощению его месторождений. Возникает необходимость расширения сырьевой базы, поиска замены традиционного сырья на новое природное и техногенное сырье [1, 2, 3, 4, 5].

Среди техногенных отходов особое место занимают шламы и шлаки металлургических производств. Ежегодно в результате производства различных металлов образуется большое количество металлургических отходов. Эти остатки считаются опасными из-за содержания в них растворимых металлов, что вызывает множество социальных проблем, таких как загрязненная вода, запыленный воздух и защелоченные почвы, а также риски для здоровья и безопасности людей и животных в результате распада отходов. Например, во всем мире глиноземная промышленность производит около 70 млн т опасных бокситовых остатков в год (так называемый красный шлам) [6, 7]. Отвалы красного шлама занимают большие площади земли и приводят ко многим серьезным экологическим проблемам. В связи с этим большую озабоченность вызывает поиск нового, эффективного способа повышения объемов утилизации красного шлама.

В настоящее время использование красного шлама привлекло значительные исследовательские интересы, такие как извлечение из них редкоземельных элементов и других ценных металлов [8], получение катализаторов [9] и материалов для защиты окружающей среды [10], стекол специального назначения [11] и др. Однако наиболее перспективно использование красного шлама в многотоннажных технологиях строительных материалов [12, 13, 14, 15, 16].

Целью настоящей работы является исследование процессов формирования фазового состава, структуры и свойств керамики на основе тугоплавкой глины с использованием красного шлама в качестве спекающей и упрочняющей добавки.

### Методы исследования

В работе применялось оборудование Центра коллективного пользования Научно-образовательного инновационного центра «Наноматериалы и нанотехнологии» ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710.

При изучении физико-химических и технологических свойств сырьевых материалов, масс и готовых изделий, а также процессов фазообразования в исследуемых объектах при нагревании в работе применялись современные физико-химические методы исследования: рентгеновский анализ (ДРОН-3М), оптическая и электронная микроскопия (SEM HITACHI S-570, РЭМ JSM-840 фирмы Jeol) и др.

### Характеристика исходных сырьевых материалов

В качестве глинистого сырья в работе применялась тугоплавкая глина Кермезузского месторождения (Республика Казахстан). По содержанию фракции размером менее 1 мкм (63,3 %) исследуемая глинистая порода представляет собой разновидность высокодисперсных глин. По химическому составу (табл. 1) это полукислая глина с высоким содержанием красящих оксидов (> 3 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и > 2 % TiO<sub>2</sub>) в прокаленном состоянии, по минералогическому составу – преимущественно каолинистая глина с некоторым присутствием гидрослюда в глинистой части и примесного кварца в грубодисперсной части.

Таблица 1

### Химический состав исследуемого сырья

Table 1

### Chemical compositions of raw materials

Вид сырья	Содержание оксидов, масс. %									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	Δ <sub>тпрк</sub>
Глина	60,31	22,00	1,37	3,17	0,65	2,29	1,19	0,22	1,16	7,67
	65,32	23,83	1,48	3,43	0,70	2,48	2,07	0,24	1,26	–
Красный шлам	21,03	7,47	2,16	17,27	23,46	2,33	0,31	0,43	1,12	24,37
	27,88	9,88	2,86	22,83	31,02	3,08	0,41	0,57	1,48	–

В качестве техногенного отхода применялся красный (бокситовый) шлам (отход от переработки железистых бокситов на технический глинозем по методу Байера на Павлодарском алюминиевом заводе Республики Казахстан). Ранее проведенные авторами исследования красного шлама [17] показали, что в исходном состоянии для него характерны высокие значения потери массы при прокаливании (до 24,37 %), что может осложнить его использование в технологическом процессе получения формованных керамических материалов.

В прокаленном состоянии в химическом составе шлама превалирует содержание оксида кальция  $\text{CaO}$  (31,02 %), оксида железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (22,83 %) и оксида кремния  $\text{SiO}_2$  (27,88 %), на долю которых приходится более 80 % (81,73 %) от общего содержания всех оксидов (табл. 1). Кальциевая составляющая представлена в виде кальцита  $\text{CaCO}_3$ , гидросиликатов и алюминатов кальция в виде двухкальциевого гидросиликата  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$  и шестикальциевого трехкарбонатного гидроалюмината  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaCO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ . Железистый компонент представлен гематитом  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и магнетитом  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  [17]. После термообработки при 1100 °С минералогический состав кристаллической части красного шлама сложен трехкальциевым алюминатом  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ , гематитом  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , геленитом  $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$  и однокальциевым ферритом  $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Оценка физико-механических свойств образцов полусухого прессования из тонкоизмельченного красного шлама, обожженных в интервале температур 900–1100 °С, свидетельствует об их полном спекании (до нулевого водопоглощения) при температуре 1100 °С с достижением прочности на сжатие до 230 МПа [17].

Таким образом, функции высокожелезистого бокситового шлама в составе композиций с алюмосиликатным сырьем (золами, глинами) при температуре обжига от 1100 до 1200 °С будут сводиться к спекающему действию за счет собственного плавления при 1150 °С.

#### **Разработка керамического материала из сырьевых смесей системы «тугоплавкая глина – красный шлам»**

Большие потери массы при прокаливании (до 25 %) бокситового шлама в исходном состоянии, осложняющие процесс его тонкого помола сухим способом в шаровых мельницах, обусловил необходимость предварительной термоподготовки шлама путем прокалывания при температуре 1000 °С, обеспечивающей его полную дегидратацию.

Подготовка керамических масс заключалась в тонком измельчении предварительно термообработанного (прокаленного) шлама в шаровой мельнице до полного прохода через сито 0063. Кемертурская глина измельчалась сухим способом до размера частиц менее 0,5 мм.

Тонкомолотый прокаленный красный шлам и глина дозировались в соотношении от 80:20 до 20:80 и тщательно гомогенизировались.

Образцы в виде таблеток и цилиндров формовались методом полусухого прессования под давлением 10 МПа. Для улучшения прессовочных свойств керамической массы шихта увлажнялась раствором органической связки. В качестве связующего использовался 1%-й раствор карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ).

Исследования процесса спекания образцов из представленных композиций проводились в температурном интервале 1100–1150 °С с шагом 50 °С.

Характер спекания изучался по степени уплотнения обожженных образцов, характеризующейся такими физическими свойствами, как водопоглощение, огневая усадка, механическая прочность на сжатие.

Внешний вид обожженных образцов приведен на рис. 1, а результаты определения физико-механических свойств – на рис. 2.

Шифр массы	Температура обжига, °С		
	1050	1100	1150
Г <sub>100</sub> Шл <sub>0</sub>			
Г <sub>80</sub> Шл <sub>20</sub>			
Г <sub>70</sub> Шл <sub>30</sub>			
Г <sub>60</sub> Шл <sub>40</sub>			
Г <sub>50</sub> Шл <sub>50</sub>			
Г <sub>40</sub> Шл <sub>60</sub>			
Г <sub>30</sub> Шл <sub>70</sub>			
Г <sub>20</sub> Шл <sub>80</sub>			
Г <sub>0</sub> Шл <sub>100</sub>			

Рис. 1. Внешний вид обожженных образцов полусухого прессования из смесей огнеупорной глины с красным шламом

Fig. 1. Burned samples produced by dry pressing from a mixture of refractory clay and red mud

Все анализируемые составы керамических масс в зависимости от соотношения тугоплавкой глины и красного шлама подразделялись на два типа:

1) смеси, в которых основой выступала тугоплавкая глина, красный шлам был добавкой (в количестве 10–40 %);

2) смеси, в которых основой был красный шлам, а глина – добавкой к нему (в количестве 10–40 %).

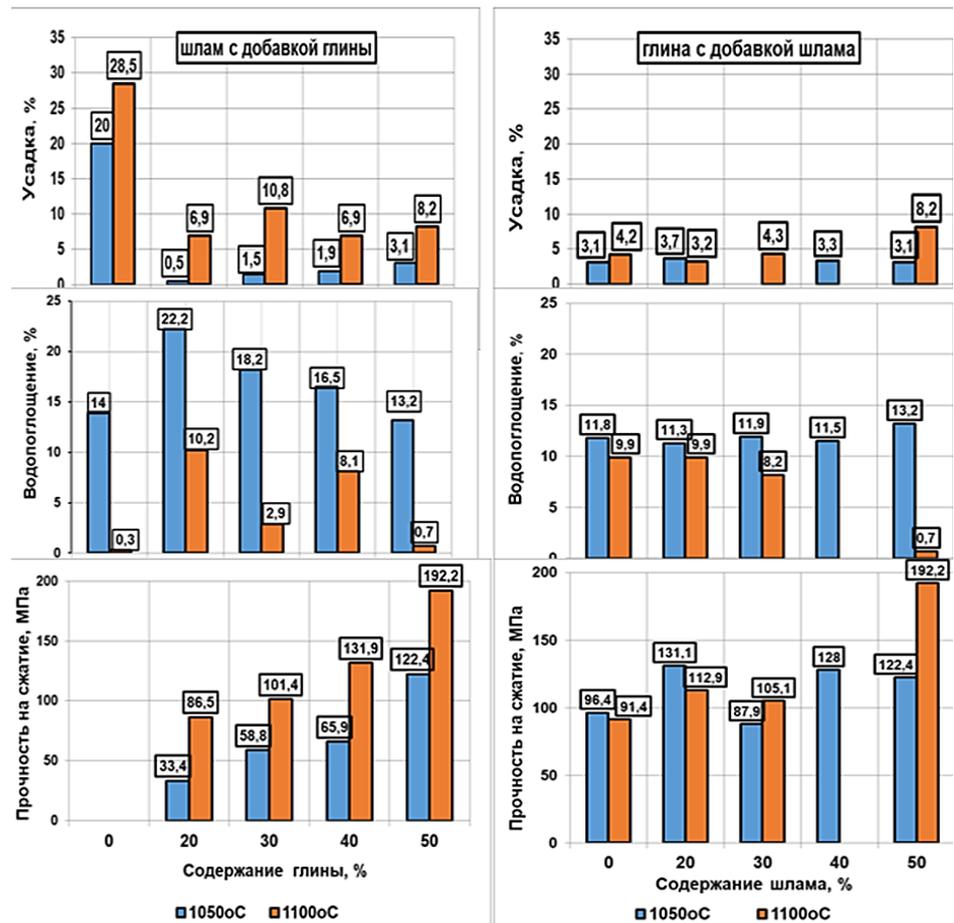


Рис. 2. Гистограмма изменения физико-механических свойств образцов полусухого прессования из композиций «тугоплавкая глина – красный шлам», обожженных в температурном интервале 1050–1100 °С

Fig. 2. Block diagrams for physical and mechanical properties of dry pressed samples from refractory clay and red mud mixture burned at 1050–1100 °С

Промежуточной была композиция с равным соотношением между глиной и шламом (50:50 %).

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что при принятых температурах обжига 1050–1100 °С образцы полусухого прессования из тугоплавкой глины без добавок  $\Gamma_{100}\text{Ш}_0$  характеризуются достаточно высокой прочностью на сжатие (91–96 МПа) при водопоглощении 10–12 % в зависимости от температуры обжига.

Дальнейшее повышение содержания добавки шлама к глине от 30 до 40 % сохраняет значения прочностных свойств до 128 МПа при температуре обжига образцов 1050 °С, что соответствует высокопрочной керамике (рис. 2).

В случае композиций, в которых основой является шлам, а глина выполняет функции добавки, введение глины в количестве 20–30 % и последующий обжиг прессованных образцов при температуре 1050 °С вызывают рез-

кое увеличение водопоглощения образцов: с 14 % (шлам без добавки глины) до 16,5–22 % (с добавкой 20–30 % глины). Повышение температуры обжига до 1100 °С активизирует процессы спекания образцов на основе шлама с добавками глины 20–40 %, приводя к снижению водопоглощения до 2,9–10,2 % и повышению прочности на сжатие до 130 МПа (рис. 2).

Объяснение указанным изменениям следует искать в физико-химических процессах, протекающих при обжиге этих композиций.

Для этого исследовался фазовый состав продуктов термообработки смесей рентгеновским методом.

Сопоставительный анализ полученных дифрактограмм позволил оценить видоизменения, претерпеваемые основными минералами исследуемой тугоплавкой глины с добавками красного шлама и красного шлама с добавками тугоплавкой глины в температурном интервале нагрева 1050–1100 °С (рис. 3).

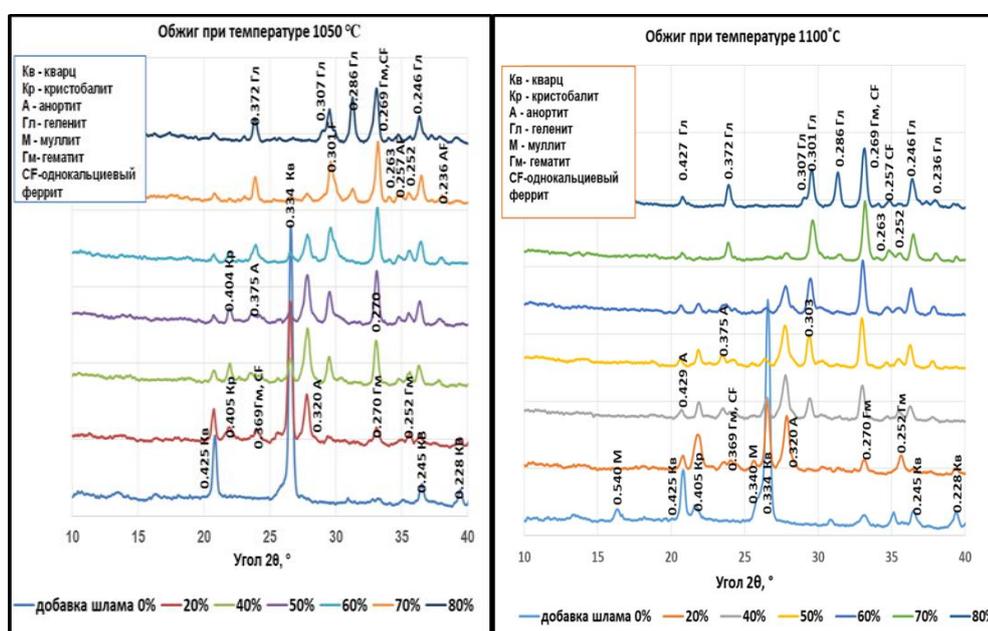


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы образцов из смеси «тугоплавкая глина – красный шлам», обожженных при температурах 1050–1100 °С

Fig. 3. XRD patterns for samples from refractory clay and red mud mixture burned at 1050–1100 °С

В случае композиций, в которых основой является тугоплавкая глина, а красный шлам используется в качестве добавки, выявлено, что уже при минимальном содержании добавки шлама в 20 %, начиная с 1050 °С, на дифрактограмме, кроме рефлексов кварца (примеси в глине), кристобалита и зачаточного муллита, образующихся при термодиссоциации каолинита, фиксируются наличие рефлексов анортита ( $d = 0,320$  нм и др.).

Увеличение содержания шлама до 40 % при температуре 1050 °С сопровождается снижением интенсивностей рефлексов кварца ( $d = 0,426$ ;  $0,335$  нм и др.), кристобалита ( $d = 0,410$  нм и др.), обусловленных присутствием глины

как основы, усилением рефлексов анортита и появлением рефлексов однокальциевого феррита ( $d = 0,269$  нм). При дальнейшем увеличении содержания вводимого шлама к глине до 60–70 % интенсивность рефлексов анортита снижается, и при содержании добавки шлама более 60 % появляются рефлексы геленита ( $d = 0,307; 0,285$  нм и др.).

При повышении температуры обжига до 1100 °С характер протекания процессов фазообразования сохраняется, меняется лишь интенсивность рентгеновских рефлексов.

Таким образом, добавка шлама к тугоплавкой исследуемой глине в количестве 20–50 % и обжиг при 1050–1100 °С обеспечивают получение керамики преимущественно с анортитовой кристаллической фазой, а с содержанием красного шлама 70–80 % в смеси с глиной – керамики с гелениновой кристаллической фазой.

Проведенные исследования позволяют определиться с оптимальными составами и технологическими режимами получения керамики на основе исследуемого сырья (табл. 2).

Таблица 2

**Рекомендуемые составы композиций, технологические параметры и свойства керамики на основе смесей тугоплавкой глины с красным шламом**

Table 2

**Compositions and process properties of ceramics based on refractory clay and red mud**

Шифр состава	Состав, %		Температура обжига, °С	Свойства обожженного керамического материала			Кристаллическая фаза
	Глина	Шлам		Усадка, %	Водопоглощение, %	Прочность на сжатие, МПа	
Из тугоплавкой глины без добавок							
Г <sub>100</sub> Ш <sub>0</sub>	100	0	1050	4,2	9,8	91,4	Кварц, муллит
Из тугоплавкой глины с добавкой шлама							
Г <sub>80</sub> Ш <sub>20</sub>	80	20	1100	3,7	11,3	131,1	Кварц, анортит, кристобалит
Г <sub>60</sub> Ш <sub>40</sub>	60	40	1050	3,3	11,5	128,7	Анортит
Г <sub>50</sub> Ш <sub>50</sub>	50	50	1050	3,1	13,2	122,4	
Из красного шлама с добавкой тугоплавкой глины							
Ш <sub>160</sub> Г <sub>40</sub>	40	60	1100	6,9	8,0	131,9	Геленит, анортит

Таким образом, композиции тугоплавкой глины с добавками красного шлама от 20 до 50 % при температуре обжига 1050 °С образуют керамические структуры с прочностью на сжатие, в 1,3–1,5 раза превышающей прочность образцов из исследуемой глины без добавки (91 и 122–131 МПа соответственно).

Электронная микроскопия позволила оценить структуру обожженных образцов (рис. 4–6).

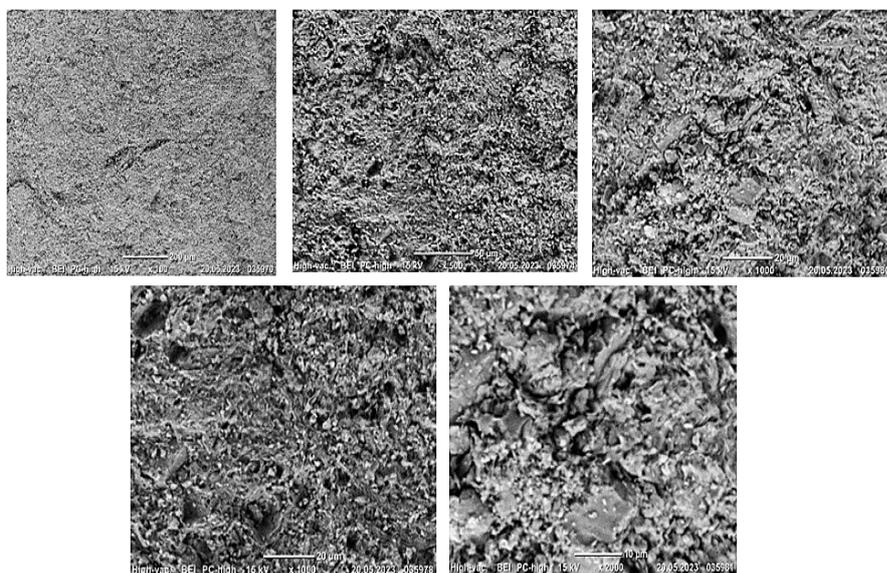


Рис. 4. Электронные микроснимки шлама образцов полусухого прессования из тугоплавкой глины без добавок (состав Г<sub>100</sub>Шл<sub>0</sub>), обожженных при температуре 1050 °С

Fig. 4. Optical images of dry pressed samples burned at 1050 °C from refractory clay without red mud (C100RM0 composition)

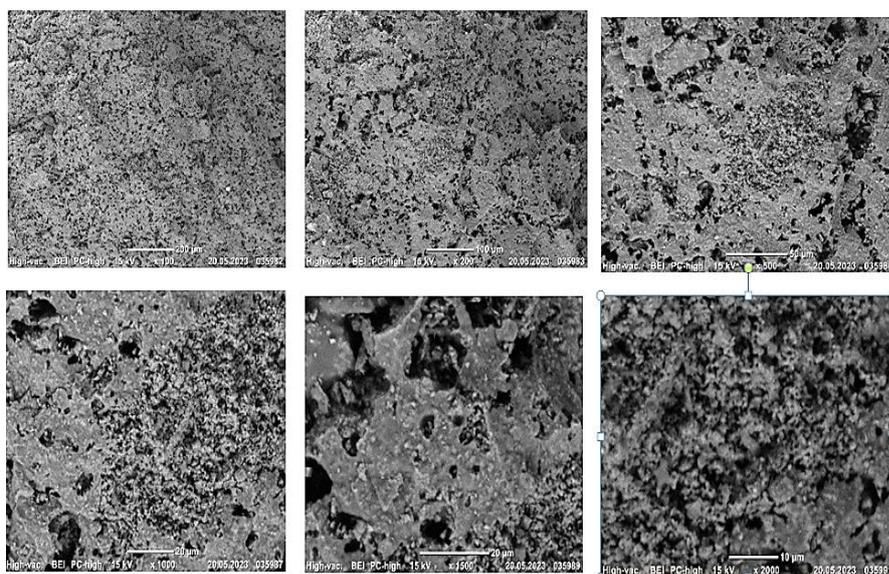


Рис. 5. Электронные микроснимки шлама образцов полусухого прессования из тугоплавкой глины с добавкой красного шлама в количестве 40 % (состав Г<sub>60</sub>Шл<sub>40</sub>), обожженных при температуре 1050 °С

Fig. 5. Optical images of dry pressed samples burned at 1050 °C from 60 % of refractory clay and 40 % of red mud (C60RM40 composition)

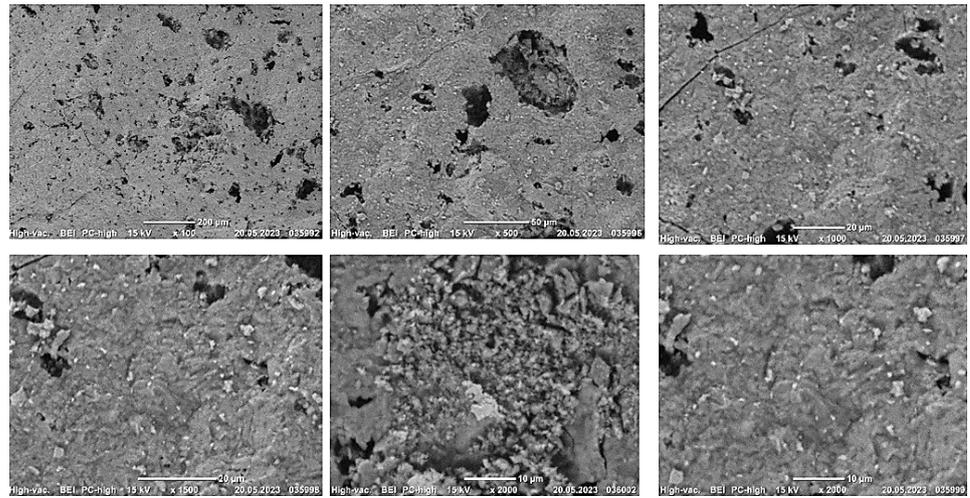


Рис. 6. Электронные микроснимки скота образцов полусухого прессования из красного шлама с добавкой тугоплавкой глины в количестве 30 % (состав Шл<sub>70</sub>Г<sub>30</sub>), обожженных при температуре 1100 °С

Fig. 6. Optical images of dry pressed samples burned at 1100 °С from 70 % of red mud and 30 % of refractory clay (RM70 C30 composition)

Согласно электронно-микроскопическим исследованиям скота образцов полусухого прессования из кемертузской глины без добавок шлама Г<sub>100</sub>Шл<sub>0</sub>, обожженных при 1050 °С (рис. 4), выявлено, что они представляют собой рыхлоспекшийся пористый керамический материал, сложенный отдельными мелкопористыми агрегатами, отделенными друг от друга глубокими извилистыми порами.

При введении в состав кемертузской глины добавки красного шлама в количестве 40 % (состав Г<sub>60</sub>Шл<sub>40</sub>) структура обожженных образцов по-прежнему остается пористой (рис. 5).

Это согласуется с одинаковыми значениями водопоглощения образцов глины без добавок и с добавкой 40 % шлама, равными 11,8 и 11,5 % соответственно, при температуре обжига 1050 °С. Однако в случае добавки красного шлама прослеживается его активирующее действие на процесс спекания образцов. Это проявляется в образовании наряду с рыхлоспеченными участками фрагментов с монолитной структурой с разобщенными внутренними порами, по форме приближающимися к сферической, что характерно для жидкофазного спекания. Такое различие в микроструктуре обожженных образцов с добавкой 40 % шлама определяет более высокие значения прочности по сравнению с образцами из глины без добавки – 128 и 91 МПа при одинаковых значениях их водопоглощения.

Увеличение количества добавки шлама к кемертузской глине до 70 % в составе Шл<sub>70</sub>Г<sub>30</sub> еще более активирует процесс жидкофазного спекания образцов, что проявляется на микроснимках в формировании плотноспеченной монолитной структуры с внутренними порами округлой формы с размерами от 5–10 до 25–50 мкм (рис. 6). Такая степень спекания хорошо согласуется с водопоглощением образцов, обожженных при 1100 °С, равным 2,5 % (см. рис. 2).

### Выводы

1. Функции высокожелезистого бокситового шлама в составе композиций с тугоплавкой глиной при температуре обжига от 1100 до 1200 °С сводятся к спекающему действию за счет собственного плавления при 1150 °С.

2. В случае использования красного шлама для получения керамических материалов его необходимо предварительно прокалить при температуре не менее 1000 °С, обеспечивающей его полную дегидратацию в сырье, а не в формованном изделии.

3. Композиции тугоплавкой глины с добавками красного шлама от 20 до 50 % при температуре обжига 1050 °С образуют керамические структуры преимущественно с анортитовой кристаллической фазой, с прочностью на сжатие, в 1,3–1,5 раза превышающей прочность образцов из исследуемой глины без добавки (91 и 122–132 МПа соответственно).

4. Использование композиции красного шлама с добавкой тугоплавкой глины в количестве 40 % и обжиг при температуре 1100 °С обеспечивают получение анортито-геленитовой керамики с водопоглощением до 8 %, с прочностью на сжатие до 132 МПа.

5. Разработанные составы керамических масс и технологические режимы определяют их перспективность для получения по полусухой технологии высокопрочной анортитовой и анортито-геленитовой керамики конструкционного и отделочного назначения.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ozturk S., Sutcu M., Erdogmus E., Gencel O.* Influence of tea waste concentration in the physical, mechanical and thermal properties of brick clay mixtures // *Construction and Building Materials*. 2019. V. 217. P. 592–599. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.114>
2. *Munoz P., Morales M.P., Mendivil M.A., Juarez M.C., Munoz L.* Using of waste pomace from winery industry to improve thermal insulation of fired clay bricks. Eco-friendly way of building construction // *Construction and Building Materials*. 2014. V. 71. P. 181–187. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.027>
3. *Gencel O.* Characteristics of fired clay bricks with pumice additive // *Energy and Buildings*. 2015. V. 102. P. 217–224. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.031>
4. *Gencel O., Erdogmus E., Sutcu M., Oren O.H.* Effects of concrete waste on characteristics of structural fired clay bricks. *Construction and Building Materials*. 2020. V. 255. P. 119362. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119362>
5. *Boltakova N.V., Faseeva G.R., Kabirov R.R., Nafikov R.M., Zakharov Yu.A.* Utilization of inorganic industrial wastes in producing construction ceramics // *Review of Russian experience for the years 2000–2015, Waste Management*. 2017. V. 60. P. 230–246. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.008>
6. *Archambo M., Kawatra S.K.* Red Mud: Fundamentals and new avenues for utilization // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2021. V. 42. № 7. P. 427–450. DOI: 10.1080/08827508.2020.1781109
7. *Li R., Zhang T., Liu Y., Li G., Xie L.* Calcification–carbonation method for red mud processing // *Journal of Hazardous Materials*. 2016. V. 316. P. 94–101. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.04.072
8. *Borra C.R., Blanpain B., Pontikes Y., Binnemans K., Van Gerven T.* Recovery of rare earths and other valuable metals from bauxite residue (red mud): a review // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2016. V. 2. P. 365–386. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0068-2>
9. *Taneez M., Hurel C.* A review on the potential uses of red mud as amendment for pollution control in environmental media // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. V. 26. P. 22106–22125. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05576-2>

10. Das B., Mohanty K. A review on advances in sustainable energy production through various catalytic processes by using catalysts derived from waste red mud // *Renewable Energy*. 2019. V. 143. P. 1791–1811. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.114>
11. Marlitan W., Venkateswara, Rao P., Tekin H.O., Sayyed M.I., Klement R, Galusek D., Lakshminarayana G., Syam Prasad P., Veeraiah N. Analysis of red mud doped Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-BaO glasses for application as glass solder in radiation shield repair using MCNPX simulation // *Ceramics International*. 2019. V. 45. № 6. P. 7619–7626. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.01.058>
12. Paramguru R.K., Rath P.C., Misra V.N. Trends in red mud utilization – a review // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2006. V. 26. № 1. P. 1–29. DOI: 10.1080/08827500490477603
13. Xia F., Cui S., Pu X. Performance study of foam ceramics prepared by direct foaming method using red mud and K-feldspar washed waste // *Ceramics International*. 2022. V. 48. № 4. P. 5197–5203. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.11.059
14. Sglavo V.M., Campostrini R., Maurina S., Carturan G., Monagheddu M., Budroni G., Cocco G. Bauxite ‘red mud’ in the ceramic industry. Part 1: thermal behavior // *Journal of the European Ceramic Society*. 2000. V. 20. № 3. P. 235–244. DOI: 10.1016/S0955-2219(99)00088-6
15. Sglavo V.M., Maurina S., Conci A., Salviati A., Carturan G., Cocco G. Bauxite ‘red mud’ in the ceramic industry. Part 2: production of clay-based ceramics // *Journal of the European Ceramic Society*. 2000. V. 20. № 3. P. 245–252. DOI: 10.1016/S0955-2219(99)00156-9
16. Liu S., Guan X., Zhang S., Dou Z., Feng C., Zhang H., Luo S. Sintered bayer red mud based ceramic bricks: Microstructure evolution and alkalis immobilization mechanism // *Ceramics International*. 2017. V. 43. № 15. P. 13004–13008. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.07.036
17. Vakalova T.V., Sergeev N.P., Tolegenov D.T., Tolegenova D.Zh. High-strength building ceramics based on fly ash – red mud mixtures // *Magazine of Civil Engineering*. 2023. V. 121. № 5. P. 12104. DOI: 10.34910/MCE.121.4

#### REFERENCES

1. Ozturk S., Sutcu M., Erdogmus E., Gencel O. Influence of tea waste concentration in the physical, mechanical and thermal properties of brick clay mixtures. *Construction and Building Materials*. 2019; 217: 592–599. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.114>
2. Munoz P., Morales M.P., Mendivil M.A., Juarez M.C., Munoz L. Using of waste pomace from winery industry to improve thermal insulation of fired clay bricks. Eco-friendly way of building construction. *Construction and Building Materials*. 2014; 71: 181–187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.027>
3. Gencel O. Characteristics of fired clay bricks with pumice additive. *Energy and Buildings*. 2015; 102: 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.031>
4. Gencel O, Erdugmus E., Sutcu M., Oren O.H. Effects of concrete waste on characteristics of structural fired clay bricks. *Construction and Building Materials*. 2020; 255: 119362. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119362>
5. Boltakova N.V., Faseeva G.R., Kabirov R.R., Nafikov R.M., Zakharov Yu.A. Utilization of inorganic industrial wastes in producing construction ceramics. Review of Russian experience for the years 2000–2015, *Waste Management*. 2017; 60: 230–246. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.008>
6. Archambo M., Kawatra S.K. Red Mud: Fundamentals and new avenues for utilization. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2021; 42(7): 427–450. DOI: 10.1080/08827508.2020.1781109
7. Li R., Zhang T., Liu Y., Li G., Xie L. Calcification–carbonation method for red mud processing. *Journal of Hazardous Materials*. 2016; 316: 94–101. DOI:10.1016/j.jhazmat.2016.04.072
8. Borra C.R., Blanpain B., Pontikes Y., Binnemans K., Van Gerven T. Recovery of rare earths and other valuable metals from bauxite residue (red mud): a review. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2016; 2: 365–386. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0068-2>
9. Taneez M., Hurel C. A review on the potential uses of red mud as amendment for pollution control in environmental media. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019; 26: 22106–22125. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05576-2>

10. Das B., Mohanty K. A review on advances in sustainable energy production through various catalytic processes by using catalysts derived from waste red mud. *Renewable Energy*. 2019; 143: 1791–1811. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.114>
11. Marlton W., Venkateswara, Rao P., Tekin H.O., Sayyed M.I., Klement R, Galusek D., Lakshminarayana G., Syam Prasad P., Veeraiah N. Analysis of red mud doped Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-BaO glasses for application as glass solder in radiation shield repair using MCNPX simulation. *Ceramics International*. 2019; 45(6): 7619–7626. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.01.058>
12. Paramguru R.K., Rath P.C., Misra V.N. Trends in red mud utilization – a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2006; 26 (1): 1–29. DOI: 10.1080/08827500490477603
13. Xia F., Cui S., Pu X. Performance study of foam ceramics prepared by direct foaming method using red mud and K-feldspar washed waste. *Ceramics International*. 2022; 48 (4): 5197–5203. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.11.059
14. Sglavo V.M., Campostrini R., Maurina S., Carturan G., Monagheddu M., Budroni G., Cocco G. Bauxite ‘red mud’ in the ceramic industry. Part 1: Thermal behavior. *Journal of the European Ceramic Society*. 2000; 20 (3): 235–244. DOI: 10.1016/S0955-2219(99)00088-6
15. Sglavo V.M., Maurina S., Conci A., Salviati A., Carturan G., Cocco G. Bauxite ‘red mud’ in the ceramic industry. Part 2: Production of clay-based ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 2000; 20 (3): 245–252 DOI: 10.1016/S0955-2219(99)00156-9
16. Liu S., Guan X., Zhang S., Dou Z., Feng C., Zhang H., Luo S. Sintered bayer red mud based ceramic bricks: Microstructure evolution and alkalis immobilization mechanism. *Ceramics International*. 2017; 43 (15): 13004–13008. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.07.036
17. Vakalova T.V., Sergeev N.P., Tolegenov D.T., Tolegenova D.Zh. High-strength building ceramics based on fly ash – red mud mixtures. *Magazine of Civil Engineering*. 2023; 121 (5): 12104. DOI: 10.34910/MCE.121.4

#### Сведения об авторах

Вакалова Татьяна Викторовна, докт. техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, tvv@tpu.ru

Сергеев Николай Петрович, аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, axioma-13@yandex.ru

Толегинов Диас Талгатович, ст. преподаватель, Торайгыров университет, 140008, Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64, tolegenov@tpu.ru

Толегинова Диана Жумабековна, аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; Торайгыров университет, 140008, Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64, tolegenova@tpu.ru

Митина Наталья Александровна, канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, mitinana@tpu.ru

#### Authors Details

Tatyana V. Vakalova, DSc, Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, tvv@tpu.ru

Nikolay P. Sergeev, Research Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, axioma-13@yandex.ru

Dias T. Tolegenov, Senior Lecturer, A/Professor, Toraighyrov University, 64, Lomov Str., 140008, Pavlodar, Republic of Kazakhstan, tolegenov@tpu.ru

Diana Zh. Tolegenova, Research Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, tolegenova@tpu.ru

*Natalia A. Mitina*, PhD, A/Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, mitinana@tpu.ru

**Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Authors contributions**

The authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.02.2024  
Одобрена после рецензирования 21.02.2024  
Принята к публикации 15.03.2024

Submitted for publication 01.02.2024  
Approved after review 21.02.2024  
Accepted for publication 15.03.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 2. С. 185–193.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (2): 185–193.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.316:691.51:658.567.1

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-185-193

EDN: RLNWVI

# СИЛИКАТНЫЕ АВТОКЛАВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНОГО АНГИДРИТОВОГО СЫРЬЯ

**Любовь Александровна Аниканова**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия*

**Аннотация.** *Актуальность.* В статье рассматриваются вопросы использования вторичного ангидритового сырья (фторангидрита) в качестве добавки при синтезе известково-кремнеземистого вяжущего, применяемого для производства силикатных материалов автоклавной обработки, что позволяет экономить природное сырье и решать экологические задачи. Показана возможность получения силикатного кирпича с требуемыми нормативными характеристиками по прочности, плотности, водопоглощению.

*Цель работы* – обоснование возможности утилизации вторичного ангидритового сырья для производства силикатных изделий, разработка способов подготовки исходных материалов, составов и режимов переработки сырья в готовые изделия.

*При этом решались следующие задачи:* выбор и исследование основных материалов, способов их подготовки для производства силикатных изделий, обоснование технологических приемов и оценка параметров качества разработанных материалов с требуемыми свойствами.

*Материалы и методы.* В работе использован фторангидрит после стадии тепловой обработки, кварцевый песок (ГОСТ 22551–2019), воздушная строительная известь (ГОСТ 9179–2018). Выбор способов подготовки сырьевых материалов обоснован нормативными требованиями к сырью при подготовке вяжущего и сырьевой массы для производства силикатных изделий. Оценка параметров качества проводилась в соответствии с требованиями ГОСТ 379–2015.

*Результаты исследований.* Установлена возможность утилизации фторангидрита при синтезе известково-кремнеземистого вяжущего вещества, используемого для получения силикатного кирпича при автоклавной обработке. В результате исследования по представленной технологии были получены образцы силикатного кирпича со следующими физико-механическими характеристиками: средняя плотность – 1750–1900 кг/м<sup>3</sup>, прочность при сжатии – 10–12,5 МПа, водопоглощение – 16–17 %. Полученные образцы удовлетворяют требованиям, предъявляемым к силикатному кирпичу, по прочности, плотности, водопоглощению и соответствуют минимальным маркам М100, М125.

*Практическая значимость.* Представлены исследования силикатных стеновых материалов с использованием вторичного сырья с требуемыми свойствами. Установлены технологические режимы автоклавирования, определены основные эксплуатационные характеристики силикатного кирпича. Предложенные способы подготовки сырья и технологические режимы производства силикатных стеновых материалов позволяют решать экологические задачи и экономить природное известняковое сырье.

*Новизна.* Установлены особенности производства силикатного кирпича с применением вторичного ангидритового сырья и зависимости, позволяющие регулировать состав и свойства силикатных материалов.

**Ключевые слова:** методология тестирования, известково-кремнеземистое вяжущее, способы подготовки сырьевой смеси, кварцевый песок, модифицированный фторангидрит, силикатный кирпич

**Для цитирования:** Аниканова Л.А. Силикатные автоклавные материалы с использованием вторичного ангидритового сырья // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 185–193. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-185-193. EDN: RLNWVI

## ORIGINAL ARTICLE

### SILICATE BRICK PRODUCTION USING ANHYDRITE RAW MATERIAL

Ljubov' A. Anikanova

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

**Abstract. Purpose:** The aim of this work is to substantiate recycling of anhydrite raw materials for the production of silicate products and the development of methods for preparing source materials, compositions and process modes.

**Methodology/approach:** Selection and research of basic materials, methods of their preparation for the production of silicate products; justification of process methods and assessment of quality parameters of materials with the required properties.

**Research findings:** The possibility of utilizing acid fluoride during the synthesis of calcareous-siliceous binder used to produce silicate bricks during autoclave processing. The obtained sand-lime brick samples possess the following physical and mechanical properties: 1750 to 1900 kg/m<sup>3</sup> average density, 10 to 12.5 MPa compressive strength, 16 or 17 % water absorption. The samples meet the requirements for sand-lime bricks, namely strength, density, water absorption and correspond to grades 100 and 125.

**Practical implications:** The process modes of autoclaving are detected and the main operational characteristics of sand-lime brick are determined. Methods proposed for preparing raw materials and process conditions of silicate wall materials allow solving environmental problems and saving natural limestone raw materials.

**Novelty:** Sand-lime brick production is based on anhydrite raw materials; suggested dependencies make it possible to control the composition and properties of silicate materials.

**Keywords:** testing methodology, lime-silica binder, raw mixture, quartz sand, acid fluoride, sand-lime brick

**For citation:** Anikanova L.A. Silicate brick production using anhydrite raw material. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 185–193. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-185-193. EDN: RLNWVI

### Введение

В настоящее время в России возрастают объемы производства строительных стеновых материалов с применением вторичного сырья, что существенно сокращает использование природного сырья, снижает стоимость готовых изделий и позволяет решать экологические вопросы.

К числу востребованных стеновых изделий относятся автоклавные силикатные материалы, производство которых связано с минимальным расходом топлива, электроэнергии, небольшой длительностью технологического

цикла. Так, расход топливно-энергетических ресурсов на производство силикатного кирпича в 2 раза ниже по сравнению с аналогичными изделиями при производстве керамики, а использование данного материала для строительства широкого спектра объектов и возможность повторного применения в производственном цикле с привлечением вторичного сырья позволяют отнести такие материалы к востребованным для современного строительства.

В России в настоящее время получила широкое распространение традиционная технология с использованием известково-кремнеземистого вяжущего и песка. Производство обладает высокой степенью автоматизации и возможностью применения различных сырьевых материалов, в том числе отходов промышленности [1, 2, 3, 4, 5, 6]. В качестве отходов в основном используют силикатную составляющую – золошлаковое вторичное сырье, в качестве известковой составляющей – различные виды извести. Предварительно проведенные исследования и анализ литературных данных позволили предложить вторичное ангидритовое сырье в качестве добавки для получения известково-кремнеземистого вяжущего.

В качестве альтернативного сырья можно применять фторангидрит – побочный продукт химических предприятий городов Ангарск, Ачинск, Северск, Полевской, Пермь, Кирово-Чепецк, складированный в отвалах ежегодно в объеме свыше полутора миллиона тонн [7, 8, 9].

Химический и гранулометрический состав вторичного сырья нестабилен, поэтому автором разработана методология тестирования и диагностики фторангидритового сырья (рис. 1), которая позволяет систематизировать научные данные о его составе, свойствах с целью направленного использования в технологиях производства строительных материалов, в том числе для производства силикатных изделий.



Рис. 1. Методология тестирования фторангидрита для производства строительных материалов  
Fig. 1. Methodology for testing fluorohydrate for constructional material production

В зависимости от механизма участия в процессах структурообразования и основных способов воздействия применять данное сырье можно в различных технологиях строительных материалов. В зависимости от способа подготовки (рис. 2) возможно использование вторичного минерального сырья для

производства вяжущих веществ, стеновых материалов с пористой и плотной структурой, отделочных материалов.



Рис. 2. Область применения кислого фторангидрита  
Fig. 2. Application area of acidic fluorohydrate

Правильный выбор исходного сырья и разработка инновационных технологических процессов изготовления строительных материалов вносят заметный вклад в решение проблемы ресурсо- и энергосбережения в строительной отрасли России [10, 11, 12].

В ранее представленных работах изучены процессы, протекающие при обжиге фторангидритового сырья [13, 14]. Отмечено, что спекание фторангидрита начинается при температуре 740 °С, а при более высоких температурах происходит разложение сырья, сопровождающееся образованием оксида кальция, являющегося сырьевым компонентом для производства силикатного кирпича.

#### Материалы и методы

В работе использованы материалы, содержащие известковый компонент (обожженный при 950 °С кислый фторангидрит), воздушная строительная известь (ГОСТ 9179–2018), песок (ГОСТ 8736–93). Для обжига применена муфельная печь, время изотермической выдержки – 2 ч. Получение вяжущего осуществлялось совместным помолом сырьевых компонентов, представленных воздушной известью, фторангидритом и кварцевым песком в течение 4 ч, в шаровой вращающейся мельнице ШЛМ-5. Формование лабораторных образцов происходило в металлических формах с геометрическими размерами 50×125×15 мм при давлении 25 МПа.

#### Результаты исследований

Силикатный кирпич представляет собой конгломерат на основе известково-кремнеземистого камня, синтезируемого в процессе автоклавной термообра-

ботки. Основными составляющими сырьевой смеси, из которых формируются изделия, служат известковый и кремнеземистый компоненты. Они являются источником CaO и SiO<sub>2</sub>, активно вступающими в химическое взаимодействие при термовлажностной обработке образца. Основную роль в процессе синтеза силикатного кирпича, в последующем формировании его физико-химических и физико-механических свойств играют технологические особенности его производства, которые включают следующие аспекты: способы подготовки сырьевых компонентов и известково-кремнеземистого вяжущего, шихты на их основе; изготовление образцов, режимы термовлажностной обработки (температура, время изотермической выдержки, давление) с использованием автоклава.

Подготовка вяжущего вещества осуществлялась по нескольким технологическим этапам, включающим обжиг фторангидрита, термообработка которого производилась в муфельной печи при температуре 900 °С. При этом скорость подъема температуры составила 4,5 °С/мин. Время изотермической выдержки – 2 ч. Охлаждение материала производилось постепенно в выключенной печи. Затем в течение 4 ч происходил совместный помол сырьевых компонентов (воздушной извести, фторангидрита и кварцевого песка) в соответствии с представленной методикой. Процентное соотношение сырьевых материалов с целью получения известково-кремнеземистого вяжущего варьировалось согласно данным табл. 1. Тонкость помола полученного вяжущего соответствовала удельной поверхности 2500–3000 см<sup>2</sup>/г.

Таблица 1

**Ингредиентный состав сырьевой смеси для производства силикатного кирпича**

Table 1

**Raw mixture composition for silicate brick production**

№ п/п	Вяжущее, %			Кварцевый песок, %	Вода, %
	Воздушная известь	Фторангидрит	Кварцевый песок		
1	20	–	20	60	10
2	15	5	20	60	10
3	10	10	20	60	10
4	5	15	20	60	10
5	25	–	25	50	10
6	18,75	6,25	25	50	10
7	12,5	12,5	25	50	10
8	6,25	18,75	25	50	10

Следующие технологические этапы производства силикатного кирпича включали приготовление шихты, представленной в виде смеси известково-кремнеземистого вяжущего и кварцевого песка (фракция 1,25–0,14), с последующим увлажнением заданным количеством воды и вылеживанием массы в течение 9 ч до полного гашения извести.

Полученные после формования образцы устанавливались в герметично закрывающийся автоклав, и осуществлялся процесс автоклавирования. Для высококачественной автоклавной обработки сырца были подобраны оптимальные технологические режимы изменения давления, которые даны в виде графика на рис. 3.

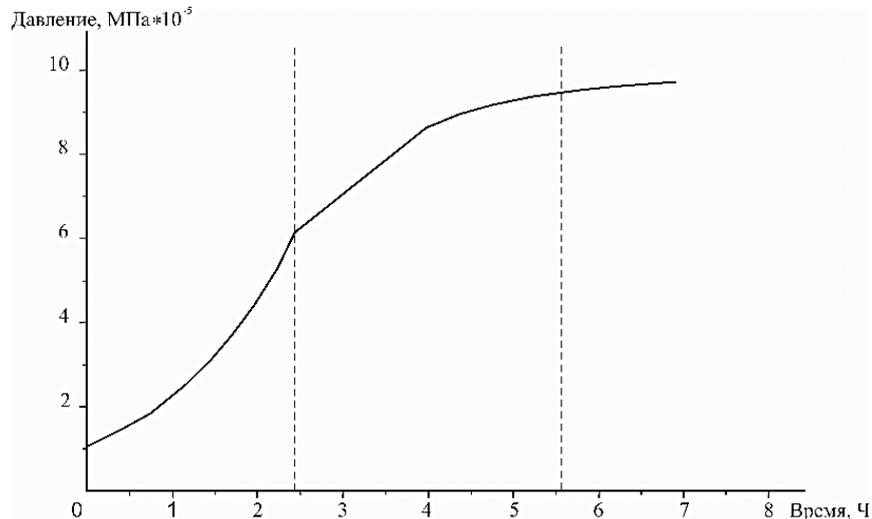


Рис. 3. Технологический режим автоклавирования  
Fig. 3. Autoclaving process conditions

При проведении эксперимента в автоклаве производился постепенный вывод параметров давления и температуры в рабочий режим. Так, подъем давления за время 2,5 ч составил от 0 до  $6 \cdot 10^{-5}$  МПа. В последующие 3 ч давление равномерно поднималось до  $10 \cdot 10^{-5}$  МПа, при достижении которого в течение последующих 3,5 ч происходили изобарные процессы. Температура в процессе автоклавирования составляла 175–190 °С. По окончании изобарных процессов осуществлялся постепенный сброс давления в течение 2 ч.

После технологического процесса автоклавирования полученные образцы силикатного кирпича извлекались из автоклава, и дальнейший процесс набора прочности проходил в естественных условиях.

Прочность силикатного кирпича во время автоклавирования формировалась в результате следующих основных процессов: структурообразования, обусловленного синтезом гидросиликата кальция, и деструкции, обусловленной внутренними напряжениями. При этом в результате автоклавной обработки кварцевый песок, входивший в состав шихты, приобретает высокую активность, вступает в химическое взаимодействие с известью и образует низкоосновные гидросиликаты кальция, которые обеспечивают интенсивный набор прочности образцов [15]. Только применение высокой температуры и давления при запаривании в автоклаве позволяет реализовать процесс твердения извести и обеспечить в результате максимальные физико-механические свойства образцов силикатного кирпича.

Эксплуатационные характеристики силикатных изделий представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Основные эксплуатационные характеристики силикатного кирпича**

Table 2

**Main operation properties of silicate brick**

№ п/п	Основные эксплуатационные характеристики силикатного кирпича (ГОСТ 379–2015)		
	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа	Водопоглощение, %
1	1750	7,5	17,0
2	1770	7,8	17,0
3	1780	8,0	16,9
4	1785	8,3	16,7
5	1790	8,5	12,5
6	1850	9,0	13,8
7	1870	12,5	14,5
8	1900	10,5	12,0

В результате исследования по представленной технологии были получены образцы силикатного кирпича со следующими физико-механическими характеристиками: средняя плотность – 1750–1900 кг/м<sup>3</sup>, прочность при сжатии – 10,0–12,5 МПа, водопоглощение – 12–17 %. Полученные образцы удовлетворяют требованиям, предъявляемым к силикатному кирпичу, по прочности и соответствуют минимальным маркам 100, 125, а также по плотности, водопоглощению, полученные значения которых находятся в пределах требуемых 1750–1900 кг/м<sup>3</sup> и менее 12 % соответственно.

**Заключение**

В результате исследования по представленной технологии были получены образцы силикатного кирпича со следующими физико-механическими характеристиками: класс по средней плотности – 1,8–2,0, прочность при сжатии – 7,5–12,5 МПа, водопоглощение – 12–17 %, марка по морозостойкости составляет F25–F35. Полученные образцы удовлетворяют требованиям, предъявляемым к силикатному кирпичу, по прочности и соответствуют минимальным маркам M100, M125.

Таким образом, установлена возможность утилизации фторангидрита при синтезе известково-кремнеземистого вяжущего вещества, используемого для получения силикатного кирпича при автоклавной обработке.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Хавкин Л.М. Технология силикатного кирпича. Москва : Стройиздат, 1982. 384 с.
2. Скрипникова Н.К., Юрьев И.Ю. Комплексное использование золошлаковых отходов Томской области для получения различных видов строительных материалов // Вестник

- Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 2 (39). С. 245–249.
3. Кузнецов Л.В., Меньшикова Т.Н. Декоративный силикатный кирпич с добавкой шлама кислородно-конвертерного производства // Строительные материалы. 2007. № 10. С. 18–19.
  4. Лесовик В.С. Генетические основы энергосбережения в промышленности строительных материалов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 1994. № 7–8. С. 96–100.
  5. Семенов А.А. Анализ состояния российского рынка силикатного кирпича // Строительные материалы. 2010. № 9. С. 4–5.
  6. Кузнецова Г.В. Запаривание силикатного кирпича в автоклаве // Строительные материалы. 2015. № 10. С. 8–18.
  7. Аниканова Л.А., Волкова О.В., Кудяков А.И., Курмангалиева А.И. Активированное композиционное фторангидритовое вяжущее // Строительные материалы. 2019. № 1–2. С. 36–42.
  8. Кудяков А.И., Аниканова Л.А., Редлих В.В. Строительные композиты на основе фторангидрита с регулируемой структурой // Архитектура и строительство. 2012. № 1 (34). С. 106–111.
  9. Аниканова Л.А., Кудяков А.И., Волкова О.В. Стеновые и отделочные материалы с использованием фторангидрита // Труды Братского государственного университета. Естественные и инженерные науки. 2015. Т. 1. С. 230–234.
  10. Володченко А.Н., Лесовик В.С. Силикатные автоклавные материалы с использованием нанодисперсного сырья // Строительные материалы. 2008. № 11. С. 42–45.
  11. Кузнецова В.Г. Оптимизация расчетов составов известково-песчаной смеси для формирования силикатного кирпича // Строительные материалы. 2010. № 9. С. 20–23.
  12. Яковлев Г.И., Кодолов В.И. Жидкофазное спекание фторангидрита при синтезе гипсокремнистых материалов // Химия и химическая технология. 1999. Т. 42. № 1. С. 97–101.
  13. Аниканова Л.А., Кудяков А.И., Никитина О.В. Влияние полимерсиликатной жидкости на водостойкость композиционных фторангидритовых вяжущих // Материалы Веймарской гипсовой конференции, 26–27 марта. Веймар, 2014. С. 183–190.
  14. Аниканова Л.А. Использование вторичного гипсосодержащего сырья для производства строительных материалов // Материалы VII Международной научно-практической конференции, 14–16 марта 2017 г. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2017. С. 31–34.
  15. Сулимова, Е.В., Лapidус М.А., Гаркави М.С. Вопросы твердения ангидритовых вяжущих // Строительные материалы. 1993. № 7. С. 12–17.

## REFERENCES

1. Khavkin L.M. Sand-lime brick technology. Moscow: Stroizdat, 1982. 384 p. (In Russian)
2. Skripnikova N.K., Yur'ev I.Yu. Sand-lime brick technology Integrated use of ash and slag waste from the Tomsk region to produce various types of building materials. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013; 2 (39): 245–249. (In Russian)
3. Kuznetsov L.V., Men'shikova T.N. Decorative sand-lime brick with oxygen-converter production sludge. *Stroitel'nye materialy*. 2007; 10: 18–19. (In Russian)
4. Lesovik V.S. Genetic basis of energy saving in the building materials industry. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 1994; 7–8: 96–100. (In Russian)
5. Semenov A.A. Market analysis of sand-lime brick in Russia. *Stroitel'nye materialy*. 2010; 9: 4–5. (In Russian)
6. Kuznetsova G.V. Steaming sand-lime brick in autoclave. *Stroitel'nye materialy*. 2015; 10: 8–18. (In Russian)
7. Anikanova A.L., Volkova O.V., Kudyakov A.I., Kurmangalieva A.I. Activated composite fluoride binder. *Stroitel'nye materialy*. 2019; 1–2: 36–42. (In Russian)
8. Kudyakov A.I., Anikanova L.A., Redlikh V.V. Composite binding acid fluoride materials for fencing. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012; 1 (34): 106–111. (In Russian)
9. Anikanova L.A., Kudyakov A.I., Volkova O.V. Wall and finishing materials using acid fluoride. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2015; 1: 230–234. (In Russian)

10. Volodchenko A.N., Lesovik V.S. Silicate autoclave materials using nanodispersed raw materials. *Stroitel'nye materialy*. 2008; (11): 42–45. (In Russian)
11. Kuznetsova G.V. Steaming sand-lime brick in autoclave. *Stroitel'nye materialy*. 2015; 10: 8–18. (In Russian)
12. Yakovlev G.I., Kodolov V.I. Liquid-phase sintering of acid fluoride in synthesis of gypsum-ceramic materials. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 1999; 42 (1): 97–101. (In Russian)
13. Anikanova L.A., Kudyakov A.I., Nikitina O.V. Influence of polymersilicate liquid on water resistance of composite fluorohydrate binders. In: *Proc. Weimar Gypsum Conference*, March 26–27. Weimar, 2014. Pp. 183–190.
14. Anikanova L.A. Recycled gypsum-containing raw materials in building material production. In: *Proc. 7th Int. Sci. Conf.*, Tomsk, 2017. Pp. 31–34. (In Russian)
15. Sulimova E.V., Lapidus M.A., Garkavi M.S. Issues of hardening of anhydrite binders. *Stroitel'nye materialy*. 1993; (7): 12–17. (In Russian)

#### Сведения об авторе

Аниканова Любовь Александровна, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, alasmit@mail.ru

#### Author Details

Ljubov' A. Anikanova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, alasmit@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.03.2024  
Одобрена после рецензирования 20.03.2024  
Принята к публикации 21.03.2024

Submitted for publication 11.03.2024  
Approved after review 20.03.2024  
Accepted for publication 21.03.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 2. С. 194–203.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (2): 194–203.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 639.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-194-203

EDN: SFQVOS

### ЭВОЛЮЦИЯ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ МУФТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ АРМАТУРНЫХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ОДНООСНОЙ ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЕМ

**Артем Михайлович Устинов, Анатолий Анатольевич Клопотов,  
Андрей Сергеевич Пляскин, Геннадий Георгиевич Волокитин**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия*

**Аннотация.** *Актуальность.* Муфтовые соединения арматуры для фиксации стыков в строительных конструкциях широко используются на практике, и, как следствие, необходима информация об особенностях распределений деформационных полей на поверхности муфтового соединения при деформационных воздействиях для получения расчетных зависимостей при эксплуатации таких арматурных соединений.

*Цель работы* – исследование напряженно-деформированного состояния стыков арматурных стержней при растяжении, натуральных узлов сопряжения элементов из арматурных стержней класса А500 методом бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы с использованием метода корреляции цифровых изображений, а также изучение влияния деформационного воздействия на микроструктуру из стали марки Ст20 методом просвечивающей электронной микроскопии.

*Результаты.* В ходе испытаний получены деформационные кривые муфтового соединения арматуры в координатах «нагрузка – перемещение» и на основе их анализа выявлены три стадии: стадия I обусловлена упругой деформацией муфтового соединения; стадия II отражает стадию параболического упрочнения; стадия III соответствует стадии, предшествующей разрушению муфтового соединения.

Анализ распределений деформационных полей на поверхности муфтового соединения методом бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы с использованием метода корреляции цифровых изображений показал, что в каждый момент времени пластическая деформация локализована в определенных зонах на образце. Выявлено, что эволюция распределений деформационных полей на поверхности муфтового соединения коррелирует со стадиями на деформационной кривой.

Установлено, что значение податливости исследуемого муфтового соединения арматурных стержней класса А500СП, изготовленного из бесшовной горячедеформирован-

ной трубы с наружным диаметром 51 мм и внутренним диаметром до 32 мм из стали марки Ст20, при действии растягивающей продольной силы вызывает появление напряжения в нормальном сечении арматурного стержня  $\sigma_{02} = 500$  МПа.

Электронно-микроскопические исследования арматурной стали позволили установить, что при деформации растяжением при  $\varepsilon = 0\text{--}5\%$  наблюдается разрушение перлита, которое сопровождается дальнейшей поляризацией дислокационной структуры. Амплитуда внутренних напряжений полей увеличивается, и при деформации  $\varepsilon = 5\%$  дальнедействующие напряжения  $\sigma_d$  становятся больше, чем напряжения, вызванные «лесом» дислокаций  $\sigma_l$ . Показано, что основной вклад в величину дальнедействующих напряжений и её изменение при  $\varepsilon = 5\%$  вносит упругая составляющая, что способствует процессу образования микротрещин.

**Ключевые слова:** муфтовое соединение, деформация, деформационные поля, электронная микроскопия, оптическая система Vic-3D

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации по проектам № FEMN-2023-0003 и №. FEMN-2022-0004.

**Для цитирования:** Устинов А.М., Клопотов А.А., Пляскин А.С., Волокитин Г.Г. Эволюция полей напряжений на поверхности муфтового соединения арматурных стержней при одноосной деформации растяжением // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 194–203. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-194-203. EDN: SFQVOS

## ORIGINAL ARTICLE

### STRESS FIELD EVOLUTION ON REBAR COUPLING CONNECTION AT UNIAXIAL TENSION

Artem M. Ustinov, Anatoly A. Klpotov,  
Andrey S. Plyaskin, Gennady G. Volokitin

Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia

**Abstract.** Rebar coupling connections are widely used for joints, and it is necessary to get information about the stress field distribution on the coupling surface at uniaxial tension to characterize operation of such joints.

**Purpose:** The aim of the work is to study the stress-strain state of rebar connections under tension, full-scale junctions of the type A500 rods, and the deformation influence on the steel microstructure of grade C1020.

**Methodology:** Non-contact three-dimensional imaging system VIC-3D and digital image correlation and tracking for studying stress-strain state of rebar connection; transmission electron microscopy for studying the steel microstructure.

**Research findings:** Load-displacement curves are suggested for the valve coupling, and three deformation stages are identified: 1) elastic deformation of the coupling connection, 2) parabolic hardening, 3) preceding the coupling connection destruction. The analysis of the strain field distribution on the coupling connection shows that at any time, plastic strain localizes in certain zones of the sample. The stress field evolution on the coupling connection correlates with the indicated deformation stages. The compliance of the rebar joint made of seamless hot-deformed tube with an outer and inner diameters 51 and 32 mm, respectively, made of C1020 steel grade, induces 500 MPa stress in the normal section of rebar under the tensile axial load.

**Value:** It is shown that during uniaxial tension of 0 to 5 %, perlite fractures, which is accompanied by further polarization of the dislocation structure. The internal stress amplitude increases and at 5% tension, far-range stresses grow as compared with those induced forest

dislocations. The main contribution to far-range stresses and their change at 5 % tension is made by the elastic component, that promotes to the microcrack formation.

**Keywords:** coupling connection, deformation, strain field, electron microscopy, VIC-3D optical system

**For citation:** Ustinov A.M., Klopotov A.A., Plyaskin A.S., Volokitin G.G. Stress field evolution on rebar coupling connection at uniaxial tension. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 194–203. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-194-203. EDN: SFQVOS

### Введение

В Российской Федерации в настоящее время в практике строительства находит широкое применение способ механического соединения в монолитном бетоне арматурных стержней и элементов сборного железобетона. Это связано с повышением требований по условиям эксплуатационной безопасности сложных сооружений и повышенной устойчивости сооружений при сейсмических воздействиях [1]. Для решения этой проблемы необходимы исследования влияния деформационных воздействий как на сам материал, так и на элементы конструкций на разных структурных уровнях [2]. На основе *in situ* исследований эволюции распределений деформационных полей в пространстве и во времени на поверхности образцов на разных масштабных уровнях в процессе пластической деформации можно получить данные, которые необходимы для решения технических задач при создании конструкций [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

Здесь важным является то, что для полного представления об особенностях изменения структурно-фазового состояния арматурной стали под действием внешних приложенных напряжений необходимы структурные исследования на микроструктурном уровне, которые можно осуществить при помощи просвечивающей электронной микроскопии. Возможности этого метода хорошо представлены в работах [10, 11, 12] по изучению влияния деформации на структурно-фазовые состояния в мартенситных сталях. В этих работах показано, что в ходе пластической деформации происходят коррелированные субструктурные превращения и изменения состояния углерода хромоникелевых сталей мартенситного класса. Превращения эти носят самосогласованный характер. Субструктурные превращения сетчатой структуры в ячеистую и затем во фрагментированную контролируются плотностью дефектов и силами твердорастворного и карбидного превращения, препятствующими их перемещению. В такой последовательности субструктур происходит переход от высокоэнергетической субструктуры к низкоэнергетической, который оказывается возможным из-за разрушения карбидов и, соответственно, уменьшения сопротивления сдвигу недислокационного происхождения. Эти процессы идут в том же направлении, что и субструктурные превращения, – в сторону термодинамического равновесия.

Вероятно, подобные явления и процессы происходят также в арматурных сталях при деформационном воздействии на них. Это обусловлено тем, что субструктурные превращения на микроструктурном уровне носят самосогласованный характер, поскольку управляющие превращением параметры сами ме-

няются в ходе деформации. Поэтому необходимы исследования как механических свойств, так и влияния деформации на микроструктуру арматурной стали.

Цель настоящей работы – провести исследования напряженно-деформированного состояния стыков арматурных стержней при растяжении натуральных узлов сопряжения элементов из арматурных стержней класса А500 методом бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы с использованием метода корреляции цифровых изображений, а методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) изучить влияние деформационного воздействия на микроструктуру стали.

### Материалы и методы исследования

**Конструкция опытного образца.** Образец для испытания изготовлен в виде узла соединения двух арматурных стержней класса А500СП с помощью обжимной муфты, представляющей собой бесшовную горячедеформированную трубу с наружным диаметром 51 мм и внутренним диаметром до 32 мм из стали марки Ст20 (ГОСТ 8732–78).

Фиксация стержней в отверстии трубы выполнялась поочередным обжатием трубы (опрессовка). На рис. 1 показано изменение геометрической формы соединительной муфты после проведения прессования при соединении двух арматурных стержней класса А500СП. Обжатие осуществляется прессом арматурным ПП-А80М с рабочим усилием обжатия 80 тс.



Рис. 1. Муфтовое соединение двух арматурных стержней в сборе после обжатия в четырех сечениях с каждой стороны

Fig. 1. Coupling connection of two rebar bars assembled after compression in four sections on each side

**Исследование механических свойств.** Механические испытания муфтового соединения при одноосном растяжении проводили на разрывной машине МР-500, на которой возможно достижение предельной нагрузки порядка 500 кН (50,96 тс). Создание напряжений проводили с постоянной скоростью 1,6 Н/мм<sup>2</sup> в секунду.

Для получения распределения перемещений и относительных деформаций по поверхности испытуемых образцов использовалась цифровая оптическая система Vic-3D [3]. Применение этой системы на основе метода численной корреляции цифровых изображений позволяет исследовать эволюцию распределений полей деформаций и перемещений на поверхности образцов.

**Исследование структуры.** Электронно-микроскопические исследования проведены методом просвечивающей электронной микроскопии с ис-

пользованием электронного микроскопа ЭМ-125. Для микроскопических исследований электроискровым методом были вырезаны пластинки после деформации из зоны разрушения образцов из арматурного стержня класса А500СП. Затем из этих образцов были получены тонкие фольги при помощи электрополировки.

### Результаты и обсуждение

**Результаты исследования механических свойств.** Были получены диаграммы деформаций муфтового соединения стальных арматурных стержней на растяжение (рис. 2). На основе анализа диаграмм установлено, что увеличение растягивающей силы до  $N = 234$  кН привело к возникновению растягивающего напряжения в сечении арматурного стержня  $\sigma_{02} = 500$  МПа. Значение податливости муфтового соединения арматурных стержней класса А500СП диаметром 28 мм при действии растягивающей продольной силы, вызывающей появление напряжения в нормальном сечении арматурного стержня  $\sigma_{02} = 500$  МПа, равно  $W = 2,48 \cdot 10^{-9}$  м/Н.

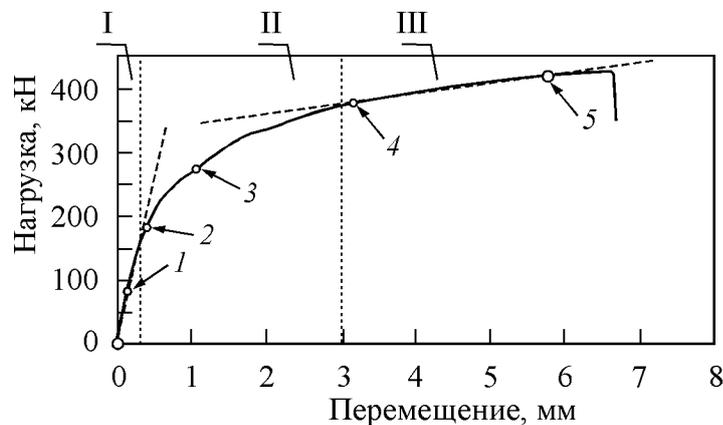


Рис. 2. Диаграммы деформаций муфтового соединения арматурных стержней класса А500СП диаметром 28 мм при растяжении. Цифрами показаны места на диаграмме, соответствующие картинам, приведенным на рис. 3

Fig. 2. Load-displacement relation of coupling connection of A500SP rebar with a diameter 28 mm under tension. Figures 1–5 match points in Fig. 3

Анализ деформационных кривых показал (рис. 2), что для исследуемого муфтового соединения характерно наличие трех стадий:

I стадия обусловлена упругой деформацией муфтового соединения;

II стадия отражает стадию параболического упрочнения;

III стадия характеризует процесс, предшествующий разрушению муфтового соединения.

Здесь при помощи измерительной системы VIC-3D получены картины, отражающие эволюцию распределения изополей относительных деформаций в процессе деформационного воздействия (рис. 3). Анализ приведенных на рис. 3 картин распределений деформационных полей на приповерхностных слоях муфтового соединения с позиций теории многостадийного деформаци-

онного упрочнения показывает хорошую корреляцию со стадиями на деформационной диаграмме в координатах «нагрузка – перемещение» (рис. 2).

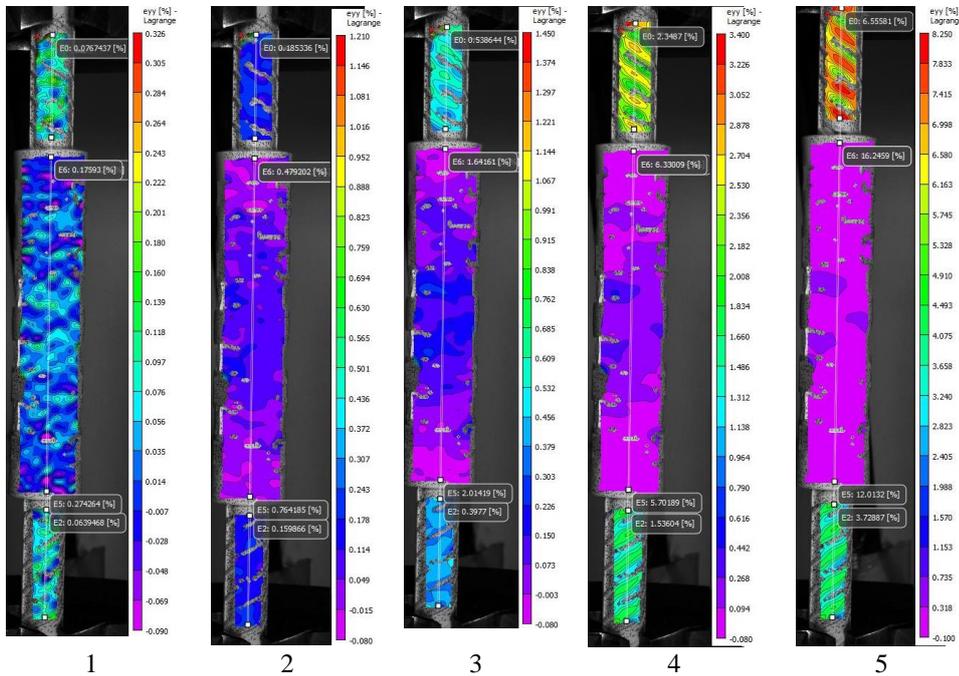


Рис. 3. Картины вертикальных относительных деформаций с поверхностями муфтового соединения на разных стадиях деформации при растяжении. Цифры показывают на диаграмме на рис. 2 соответствующие деформационно-напряженные состояния образца при испытании

Fig. 3. Vertical relative strain on coupling connection at different strain stages. Figures 1–5 match points in Fig. 2

В работе [12] показано, что характер распределения очагов пластической деформации хорошо коррелирует со стадиями на деформационных кривых на монолитных образцах. На параболической стадии на монолитных образцах наблюдается стационарная картина очагов локализованной деформации. В данном случае мы имеем дело со сборной конструкцией, а именно с муфтовым соединением (см. рис. 1). Несмотря на такое различие между монолитными и сборными образцами, также наблюдаются различные стадии на деформационных кривых, характеризующие упругий и пластический характер деформации.

Переход к стадии III сопровождается уменьшением коэффициента деформационного упрочнения  $\theta = \partial P / \partial l$  ( $P$  – нагрузка,  $l$  – перемещение) (рис. 2) и изменением в характере расположения структурных элементов (рис. 3). Эта стадия соответствует стадии, предшествующей разрушению муфтового соединения.

Анализ распределений локальных очагов пластической деформации муфтового соединения показал, что в каждый момент времени пластическая деформация локализована в определенных зонах образца. При этом в других объемах материала при заданном приросте деформация практически не наблюдает-

ся (рис. 3). На стадии параболического упрочнения (см. рис. 2) на картинах распределений деформационных полей (рис. 3) проявляется распределение локальных очагов деформаций в виде зон локализации деформации, расположенных на одинаковых расстояниях.

Картины распределений поверхностных деформаций муфтового соединения арматурных стержней класса А500СП при одноосном растяжении приведены на рис. 3, где видно, что картины распределений деформационных полей на разных стадиях имеют разный характер. Картина распределения деформационных полей на стадии I отражает упругие деформации на поверхности муфтового соединения. На стадии II картина распределения деформационных полей соответствует неупругим деформациям на поверхности муфтового соединения. На стадии III, предшествующей разрушению муфтового соединения, происходит образование ограниченного числа локализованных областей со значительными значениями пластической деформации.

**Результаты структурных исследований.** Проведенные исследования методом просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонкой структуры арматурной стали класса А500СП показали, что морфологически составляющими матрицы стали являются полностью разрушенный пластинчатый перлит и фрагментированный феррит. Дислокационная структура частично поляризована. Внутренние поля напряжений невелики.

При деформационном нагружении при растяжении образцы разрушались. Методом просвечивающей электронной микроскопии были проведены исследования в зоне разрыва с целью выявления источников, приводящих к разрушению образца.

На рис. 4 приведено изображение тонкой структуры феррита, полученное методом ПЭМ. Фрагменты во фрагментированном феррите присутствуют как близкие к изотропным, так и анизотропные.

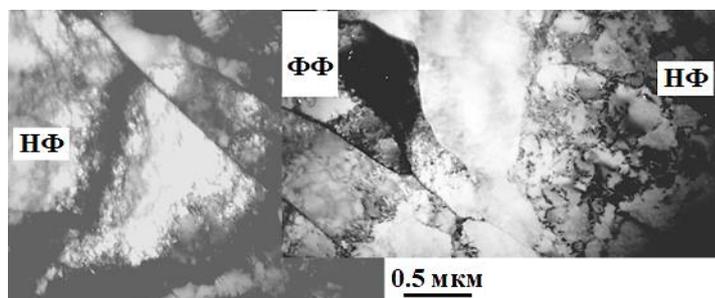


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры феррита в основном металле (НФ – нефраgmentированный феррит, ФФ – фрагментированный феррит)

Fig. 4. TEM image of ferrite structure in the base metal (non-fragmented ferrite, fragmented ferrite)

На основе анализа микродифракционных картин установлено, что изотропные фрагменты имеют точечную микродифракционную картину, на которой присутствуют рефлексы, принадлежащие только одной плоскости. Это означает, что изотропные фрагменты практически не разориентированы ( $\alpha_{ав} = 1-3^\circ$ ). Мик-

родифракционные картины, полученные от анизотропных фрагментов, содержат также рефлексы, принадлежащие только одной плоскости, но все рефлексы имеют тяжи. Из этого следует, что фрагменты разориентированы, а угол азимутальной разориентации соответствует величине  $\alpha_{аз} = 10-15^\circ$ .

Исследования показали, что на границах фрагментов (как изотропных, так и анизотропных) часто присутствуют микротрещины. Установлено, что более крупные трещины образуются по границам раздела «феррит – перлит». При этом, с одной стороны, в результате аннигиляции дислокаций произошло «рассыпание» дислокационных границ фрагментов. Фрагментированная структура превратилась в нефрагментированную. А поскольку на границах фрагментов феррита присутствовали частицы  $Fe_3C$ , то фактически образовалась феррито-карбидная смесь.

### Заключение

Выявлено три стадии деформационных кривых исследуемого муфтового соединения: стадия I обусловлена упругой деформацией муфтового соединения; стадия II отражает стадию параболического упрочнения; стадия III соответствует стадии, предшествующей разрушению муфтового соединения.

Установлено, что значение податливости исследуемого муфтового соединения арматурных стержней при действии растягивающей продольной силы, вызывающей появление напряжения в нормальном сечении арматурного стержня  $\sigma_{02} = 500$  МПа, равно  $W = 2,48 \cdot 10^{-9}$  м/Н.

Анализ распределений деформационных полей на поверхности муфтового соединения методом бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы с использованием метода корреляции цифровых изображений показал, что в каждый момент времени пластическая деформация локализована в определенных зонах на образце. Выявлено наличие зон локализованной деформации, и распределение этих зон имеет разный характер на разных стадиях деформационной кривой муфтового соединения.

В результате измерения структурных параметров арматурной стали электронно-микроскопическим методом установлено, что деформация растяжением при  $\varepsilon = 0-5\%$  приводит к разрушению перлита и дальнейшей поляризации дислокационной структуры. Амплитуда внутренних напряжений полей увеличивается, и при  $\varepsilon = 5\%$   $\sigma_d > \sigma_l$  ( $\sigma_d$  – дальнедействующие напряжения;  $\sigma_l$  – напряжения, вызванные «лесом» дислокаций). Основной вклад в величину  $\sigma_d$  и её изменение при  $\varepsilon = 5\%$  вносит упругая составляющая, что приводит к образованию микротрещин.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. РД ЭО 0657-2006. Положение по применению механических соединений арматуры для железобетонных конструкций зданий и сооружений атомных станций.
2. Марущак П.О., Панин С.В., Студент А.З., Овечкин Б.Б. Масштабные уровни деформации и разрушения теплостойких сталей / под ред. В.Ф. Пичугина. Томск : Изд-во ТПУ, 2013. 236 с.
3. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. Москва : Наука, 1983. 280 с.

4. Разумовский И.А. Развитие оптических методов механики деформируемого тела (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 10. С. 45–54.
5. Третьякова Т.В. Особенности использования программного обеспечения VIC-3D, реализующего метод корреляции цифровых изображений, в приложении к исследованию полей неупругих деформаций // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т. 7. № 2. С. 162–171.
6. Третьякова Т.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Оценка точности измерений с использованием видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций // Вестник ПГТУ. Механика. Пермь : Перм. ГТУ. 2011. № 2. С. 92–100.
7. Ustinov A., Kopanitsa D., Potekaev A., Klopotov A. Distribution of local deformations on the near-surface layers and scale effects of low alloy steel specimens // AIP Conference Proceedings. 2015. V. 1683. 020233.
8. Kopanitsa D.G., Ustinov A.M., Potekaev A.I., Klopotov A.A., Kopanitsa G.D. Macro-carriers of Plastic Deformation of Steel Surface Layers Detected by Digital Image Correlation // Advanced Materials in Technology and Construction (AMTC-2015) AIP Conf. Proc. 1698, 030014-1–030014-8.
9. Иванова В.С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов. Москва : Наука, 1992. 159 с.
10. Козлов Э.В., Попова Н.А., Игнатенко Л.Н., Теплякова Л.А. Субструктурные и карбидные превращения при пластической деформации в отпущенной хромоникелевой мартенситной стали // Известия вузов. Физика. 1992. № 12. С. 25–32.
11. Козлов Э.В., Попова Н.А., Игнатенко Л.Н., Теплякова Л.А., Клопотов А.А. Закономерности субструктурно-фазовых превращений при пластической деформации мартенситной стали // Известия вузов. Физика. 1994. № 4. С. 52–60.
12. Козлов Э.В., Попова Н.А., Игнатенко Л.Н., Теплякова Л.А., Клопотов А.А., Конева Н.А. Влияние типа субструктуры на перераспределение углерода в стали мартенситного класса в ходе пластической деформации // Известия вузов. Физика. 2002. № 3. С. 72–86.

## REFERENCES

1. Regulations on the use of mechanical rebar connections for reinforced concrete structures and nuclear power plants. (In Russian)
2. Marushchak P.O., Panin S.V., Student A.Z., Ovechkin B.B. Deformation destruction of heat-resistant steels. Tomsk: TPU, 2013. 236 p. (In Russian)
3. Alyokhin V.P. Physics of strength and plasticity of surface layers of materials. Moscow: Nauka, 1983. 280 p. (In Russian)
4. Razumovsky I.A. Development of optical methods of deformable body mechanics (review). *Zavodskaya lab. Diagnostics of materials*. 2008; 74 (10): 45–54. (In Russian)
5. Tretyakova T.V. VIC-3D software for digital image correlation for inelastic deformations. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*. 2014; 7 (2): 162–171. (In Russian)
6. Tretyakova T.V., Tretyakov M.P., Wildeman V.E. Measurement accuracy evaluated by video system for analyzing displacement and deformation fields. *Vestnik PGTU. Mekhanika*. 2011; (2): 92–100. (In Russian)
7. Ustinov A., Kopanitsa D., Potekaev A., Klopotov A. Distribution of local deformations on the near-surface layers and scale effects of low alloy steel specimens. *AIP Conference Proceedings*. 2015; 1683. 020233.
8. Kopanitsa D.G., Ustinov A.M., Potekaev A.I., Klopotov A.A., Kopanitsa G.D. Macro-carriers of plastic deformation of steel surface layers detected by digital image correlation. *Advanced Materials in Technology and Construction. AIP Conf. Proc.* 1698, 030014-1–030014-8.
9. Ivanova B.C. Synergetics. Strength and fracture of metal materials. Moscow: Nauka, 1992. 159 p. (In Russian)
10. Kozlov E.V., Popova N.A., Ignatenko L.N., Teplyakova L.A. Substructural and carbide transformations during plastic strain of tempered chromium-nickel martensitic steel. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 1992; (12): 25–32. (In Russian)
11. Kozlov E.V., Popova N.A., Ignatenko L.N., Teplyakova L.A., Klopotov A.A. Structure and phase transformations during plastic strain of martensitic steel. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 1994; (4): 52–60. (In Russian)

12. Kozlov E.V., Popova N.A., Ignatenko L.N., Teplyakova L.A., Klopotov A.A., Koneva N.A. Influence of substructure type on carbon redistribution in martensitic steel during plastic strain. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2002; (3):72–86. (In Russian)

#### Сведения об авторах

Устинов Артем Михайлович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [ustinov\\_a\\_m@tsuab.ru](mailto:ustinov_a_m@tsuab.ru)

Клопотов Анатолий Анатольевич, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [klopotovaa@tsuab.ru](mailto:klopotovaa@tsuab.ru)

Пляскин Сергей Андреевич, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [Plyaskinandrei@mail.ru](mailto:Plyaskinandrei@mail.ru)

Волокитин Геннадий Георгиевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [vgg-tomsk@mail.ru](mailto:vgg-tomsk@mail.ru)

#### Authors Details

Artem M. Ustinov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, [ustinov\\_a\\_m@tsuab.ru](mailto:ustinov_a_m@tsuab.ru)

Anatoly A. Klopotov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, [klopotovaa@tsuab.ru](mailto:klopotovaa@tsuab.ru)

Andrey S. Plyaskin, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, [Plyaskinandrei@mail.ru](mailto:Plyaskinandrei@mail.ru)

Gennady G. Volokitin, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, [vgg-tomsk@mail.ru](mailto:vgg-tomsk@mail.ru)

#### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Authors contributions

The authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.03.2024  
Одобрена после рецензирования 19.03.2024  
Принята к публикации 20.03.2024

Submitted for publication 04.03.2024  
Approved after review 19.03.2024  
Accepted for publication 20.03.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 2. С. 204–218.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (2): 204–218.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.045.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-204-218

EDN: ZVTDVK

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЛИНЕЙНО-УПРУГИХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Григорий Иванович Гребенюк<sup>1</sup>, Максим Сергеевич Вешкин<sup>2</sup>,  
Виталий Иванович Максак<sup>1</sup>, Дарья Александровна Жилина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный  
архитектурно-строительный университет (Сибстрин),  
г. Новосибирск, Россия

**Аннотация.** Актуальность. Импульсные нагрузки на сооружения являются одними из наиболее опасных с позиции величин параметров напряжённо-деформированного состояния системы при динамическом воздействии.

**Цель** исследования – анализ особенностей динамического деформированием линейно-упругих стержневых систем при периодическом импульсном воздействии.

Рассмотрены особенности процессов деформирования линейно-упругих стержневых систем при периодических импульсных воздействиях. На примере простой стержневой системы с дополнительными сосредоточенными массами проведён анализ влияния сочетания параметров нагрузки (протяженность, форма и частота импульсов), а также физических характеристик деформируемой системы на её динамический отклик при заданном воздействии.

**Результаты.** Сформулированы предпосылки для выявления неблагоприятного (с позиции величин параметров НДС систем) сочетания параметров воздействия с параметрами рассматриваемой системы.

**Ключевые слова:** упругие стержневые системы, импульсные нагрузки, периодические воздействия, расчет

**Для цитирования:** Гребенюк Г.И., Вешкин М.С., Максак В.И., Жилина Д.А. Особенности расчета линейно-упругих стержневых систем при периодических импульсных воздействиях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 204–218. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-204-218. EDN: ZVTDVK

ORIGINAL ARTICLE

**STRENGTH ANALYSIS OF LINEAR-ELASTIC FRAME STRUCTURES UNDER PULSE-PERIODIC LOADS****Grigori I. Grebenyuk<sup>1</sup>, Maksim S. Veshkin<sup>2</sup>,  
Vitali I. Maksak<sup>1</sup>, Dar'ya A. Zhilina<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*<sup>2</sup>*Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,  
Novosibirsk, Russia*

**Abstract.** Pulse-periodic loads on structures are one of the most dangerous for the their stress-strain state under dynamic load.

**Purpose:** The aim of the work is to analyze the dynamic deformation of linear-elastic frame structures under pulse-periodic loads.

**Approach:** It is found that a simple frame structure with additional concentrated masses affects the loading parameters (length, shape and pulse frequency). The analysis is given to physical characteristics of the deformed structure and its dynamic response under the pulse-periodic load.

**Research findings:** Prerequisites are formulated for an unfavorable (from the position of VAT parameters) combination of the load and structural parameters.

**Keywords:** elastic rod systems; impulse loads; periodic exposures; calculation

**For citation:** Grebenyuk G.I., Veshkin M.S., Maksak V.I., Zhilina D.A. Strength analysis of linear-elastic frame structures under pulse-periodic loads. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 204–218. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-204-218. EDN: ZVTDVK

**Введение**

Импульсные нагрузки на сооружения, особенно нагрузки большой мощности и малой протяженности во времени (ударные), являются одними из наиболее опасных с позиции величин параметров напряжённо-деформированного состояния (НДС) системы при динамическом воздействии [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Опасность подобного вида нагрузок может увеличиться при периодическом импульсном воздействии [9, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

Многие работы, выполненные в последнее время в направлении развития методов расчета динамически нагруженных систем (в том числе стержневых), связаны с уточнением модели деформирования материала. Некоторые исследования затрагивают вопросы динамики систем из композитных стержней [7, 8]. Значительно меньше внимания уделено учету особенностей динамического воздействия, в частности, периодическому характеру импульсных нагрузок.

Некоторые исследования в этой области посвящены математической стороне описания процессов при периодических импульсных воздействиях [12, 13, 14, 15]. Значительно меньше внимания уделено рассмотрению и практическому расчёту систем под действием периодических импульсных воздействий [16, 17, 18].

Между тем такие воздействия могут вызывать как природные явления (удары волн на гидротехнические сооружения, ветровые порывы), так и технологические процессы на промышленных объектах.

Целью настоящего исследования является анализ особенностей динамического деформированием линейно-упругих стержневых систем при периодическом импульсном воздействии.

### Основные характеристики периодических импульсных нагрузок

В качестве основных характеристик периодических импульсных воздействий рассматриваются:

–  $T_{imp}$  – длительность импульса (для протяжённых импульсов),  $T_{rep}$  – период повторения импульсов,  $Imp$  – значение отдельного импульса;

– места приложения импульсных нагрузок.

Соотношение:

$$k_{i-r} = \frac{T_{imp}}{T_{rep}}. \quad (1)$$

### Периодические мгновенные (ударные) импульсы

При рассмотрении мгновенных периодических импульсов вычисляются приращения скорости точек, в которые прикладывается импульсное воздействие:

$$[m]\Delta\dot{Z} + R_S = 0. \quad (2)$$

Здесь  $[m]$  – матрица масс;  $\Delta\dot{Z}$  – вектор приращений скорости;  $R_S$  – вектор узловых «мгновенных реакций», вызванных мгновенными импульсами.

В промежутке времени между двумя соседними импульсами рассматривается свободное движение системы. Начальными условиями при рассмотрении последующего интервала времени являются перемещения и скорости точек системы в конце предыдущего интервала времени.

### Периодические протяжённые импульсы

При рассмотрении протяжённых периодических импульсов последовательно чередуются промежутки движения системы под действием динамической нагрузки (неустановившиеся вынужденные колебания) и свободное движение системы. Начальными условиями при рассмотрении последующего интервала времени являются перемещения и скорости точек системы в конце предыдущего интервала.

### «Наложение» периодических протяжённых импульсов

В случае, когда длительность периодических импульсов превышает период их повтора, импульсную нагрузку можно представить в виде двух составляющих: постоянной составляющей (за счёт наложения двух и более соседних импульсов) и динамической составляющей, обусловленной формой импульсов и их сменой. Следует отметить, что динамическая составляющая таких импульсов снижается по мере повышения длительности отдельных импульсов. Пример наложения синусоидальных импульсов длительностью  $T_{imp} = 1$  с и периодом повтора  $T_{rep} = 0,4$  с приведён на рис. 1

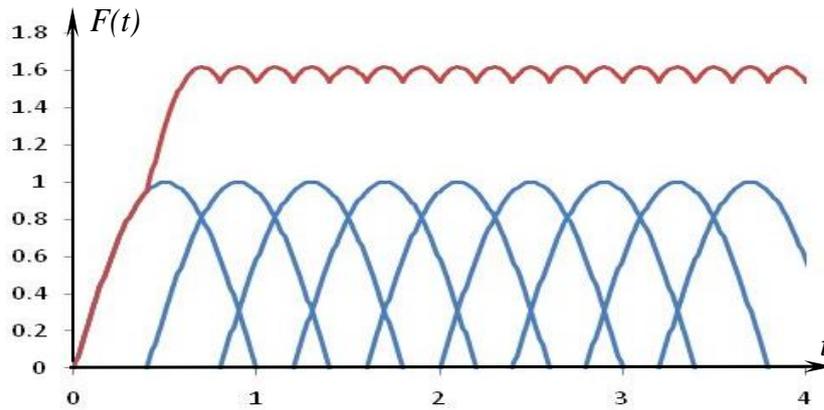


Рис. 1. Пример наложения периодических импульсов  
 Fig. 1. Example of periodic pulse application

**О корректном учёте периодических импульсов  
 с позиции средней мощности периодического воздействия**

Введём параметр периодической нагрузки – *средняя по модулю мощность периодического воздействия*. Для описания этой величины проведём следующие рассуждения.

Обозначим время, соответствующее одному периоду действия гармонической нагрузки (или одному периоду повтора импульсной нагрузки):

$$T_{rep} = \frac{1}{f_F} = \frac{2\pi}{\omega_F}, \tag{3}$$

где  $f_F$  – частота, Гц;  $\omega_F$  – круговая частота,  $c^{-1}$ .

При установившихся вынужденных колебаниях импульс, переданный системе за один период действия гармонической нагрузки, с учетом сонаправленности нагрузки и движения системы (функция нагрузки в формуле (4) учитывается по модулю) составляет

$$\begin{aligned} P_{harm} &= \int_0^{T_{rep}} F_0 |\sin(\omega_F \cdot t)| dt = \\ &= \int_0^{0,5T_{rep}} F_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T_{rep}} t\right) dt + \int_{0,5T_{rep}}^{T_{rep}} F_0 \left(-\sin\left(\frac{2\pi}{T_{rep}} t\right)\right) dt = \\ &= \frac{F_0 \cdot T_{rep}}{2\pi} \left[ -\cos\left(\frac{2\pi}{T_{rep}} t\right) \Big|_0^{0,5T_{rep}} + \cos\left(\frac{2\pi}{T_{rep}} t\right) \Big|_{0,5T_{rep}}^{T_{rep}} \right] = \\ &= \frac{F_0 \cdot T_{rep}}{2\pi} [4] = 2 \frac{F_0 \cdot T_{rep}}{\pi}, \end{aligned} \tag{4}$$

где  $F_0$  – амплитуда гармонической нагрузки.

При стабилизации амплитуд и форм откликов системы (во времени) под действием периодических импульсов импульс, переданный системе за один период, равен значению отдельного импульса  $Imp$  :

$$P_{imp} = Imp . \quad (5)$$

Для периодических импульсов синусоидальной формы длительностью  $T_{imp}$  (рис. 2) импульс, переданный системе за один период:

$$\begin{aligned} P_{imp} &= \int_0^{T_{imp}} F_{0imp} \sin\left(\frac{\pi}{T_{imp}} t\right) dt = \frac{F_{0imp} \cdot T_{imp}}{\pi} \left[ -\cos\left(\frac{\pi}{T_{imp}} t\right) \right]_0^{T_{imp}} = \\ &= \frac{F_{0imp} \cdot T_{imp}}{\pi} [1 + 1] = 2 \frac{F_{0imp} \cdot T_{imp}}{\pi} , \end{aligned} \quad (6)$$

где  $F_{0imp}$  – амплитуда синусоидального импульса (рис. 2).

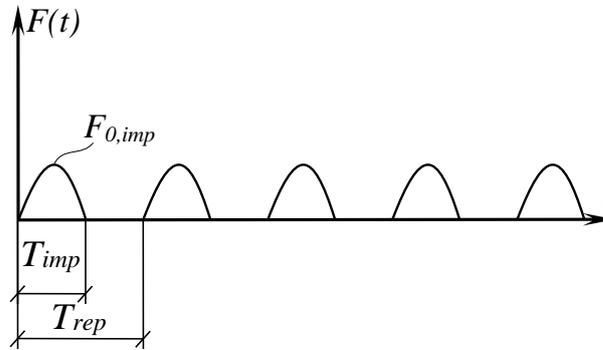


Рис. 2. График периодических импульсов синусоидальной формы во времени  
Fig. 2. Periodic sinusoidal pulses over time

Для простоты рассмотрим период времени, соответствующий  $n$  периодам действия нагрузки:

$$T_n = n \cdot T_{rep} . \quad (7)$$

Для гармонической нагрузки средняя мощность периодического воздействия составит

$$P_{spec, harm} = \frac{n \cdot P_{harm}}{T_n} = \frac{n}{n \cdot T_{rep}} 2 \frac{F_0 \cdot T_{rep}}{\pi} = 2 \frac{F_0}{\pi} , \quad (8)$$

т. е. для гармонической нагрузки значение  $P_{spec, harm}$  является частотно независимым.

Для периодической импульсной нагрузки средняя мощность составит

$$P_{spec, imp} = \frac{n \cdot P_{imp}}{T_n} = \frac{n}{n \cdot T_{rep}} Imp = f_F \cdot Imp . \quad (9)$$

При синусоидальной форме периодических импульсов, с учётом (6), средняя мощность

$$P_{spec, imp} = \frac{n \cdot P_{imp}}{T_n} = \frac{n}{n \cdot T_{rep}} 2 \frac{F_{0imp} \cdot T_{imp}}{\pi} = f_F 2 \frac{F_{0imp} \cdot T_{imp}}{\pi}, \quad (10)$$

и в случае периодической импульсной нагрузки значение  $P_{spec, imp}$  является частотно зависимым.

Таким образом, для корректного сравнения периодических импульсных нагрузок различной частоты, а также сопоставления их с гармоническими нагрузками, с позиции соответствия значений средней мощности периодического воздействия  $P_{spec, imp}$ , следует учитывать, что значения периодических импульсов  $Imp$  должны быть обратно пропорциональны их частоте:

$$Imp = \frac{k}{f_F}, \quad (11)$$

где  $k$  – константа.

При сравнении с гармонической нагрузкой с учётом соответствия по выражениям (8) и (9)

$$Imp = 2 \frac{F_0}{\pi \cdot f_F}. \quad (12)$$

Для периодических импульсов синусоидальной формы их амплитуда  $F_{0imp}$ , соответствующая амплитуде гармонической нагрузки  $F_0$ , выражается из формул (8), (10):

$$F_{0imp} = \frac{F_0}{T_{Imp} \cdot f_F} = \frac{F_0 \cdot T_{rep}}{T_{Imp}}. \quad (13)$$

### Основные задачи исследования

В настоящем исследовании рассмотрены следующие задачи оценки динамического отклика системы на периодические импульсные воздействия:

1. Развитие процесса колебаний во времени в условиях резонансного и нерезонансного процессов.
2. Влияние параметра  $k_{i-r}$  на НДС системы в условиях резонансного процесса, а также сравнение с динамическим откликом системы при действии гармонических нагрузок.
3. Рассмотрение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) колебаний системы.

### Исследование влияния основных характеристик периодических импульсных воздействий на динамические отклики системы

Для исследования влияния перечисленных выше факторов и выявления их неблагоприятных сочетаний (в отношении динамического отклика) рассмотрена стержневая система, представленная на рис. 3.

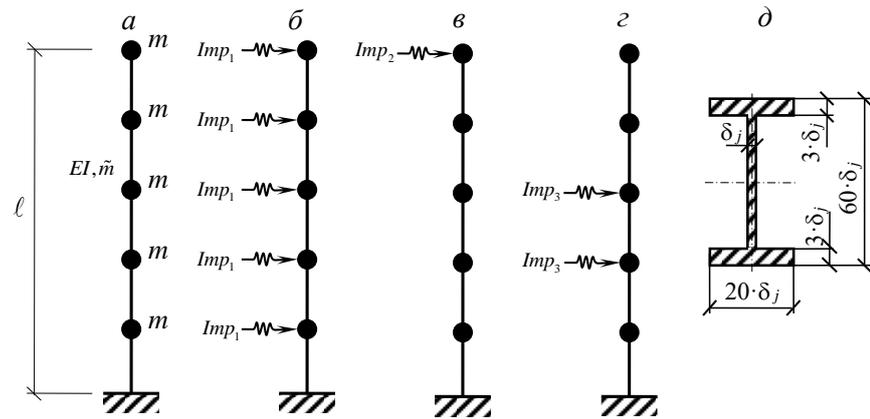


Рис. 3. Расчётная схема стержневой системы:

*a* – стержневая система; *б* – схема импульсных нагрузок во все узлы; *в* – схема импульсной нагрузки в крайний узел; *г* – схема импульсных нагрузок в промежуточные узлы; *д* – форма сечений элементов

Fig. 3. Design scheme of frame structure:

*a* – frame structure; *b* – pulse delivery to all nodes; *c* – pulsed load at extreme node; *d* – pulse delivery to intermediate nodes; *e* – section shape

$EI = 232\,432,2 \text{ кН} \cdot \text{м}^2$ ,  $EA = 3\,654\,000 \text{ кН}$  – жесткостные характеристики стержней;  $\delta_j = 0,01 \text{ м}$  – параметр, определяющий размеры сечения;  $m = 0,1 \text{ т}$  – узловы массы;  $\dot{m} = 0,1366 \text{ т/м}$  – погонная масса стержня;  $\gamma = 0,022$  – коэффициент внутреннего трения стали;  $Imp_1, Imp_2 = 5Imp_1$ ,  $Imp_3 = 2,5Imp_1$  – узловы периодические импульсы. Собственный вес системы не учитывался.

Было выполнено сравнение откликов системы при действии периодических импульсов с соответствующими откликами при действии гармонической нагрузки (рис. 4).

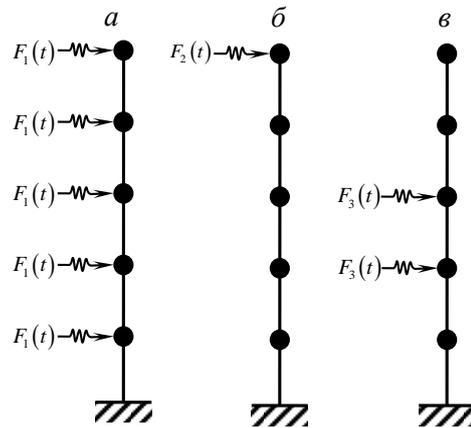


Рис. 4. Варианты приложения узловой гармонической нагрузки:

*a* – во все узлы; *б* – в крайний узел; *в* – в промежуточные узлы

Fig. 4. Harmonic load applications:

*a* – to all nodes; *b* – to extreme node; *c* – to intermediate nodes

$$F_k(t) = F_{0k} \sin(\omega_F t). \quad (14)$$

Амплитуды гармонической нагрузки приняты соответственно:  $F_{0,1} = 0,13152$  (кН);  $F_{0,2} = 5F_{0,1}$ ;  $F_{0,3} = 2,5F_{0,1}$ .

Периодические импульсные воздействия приняты в соответствии с условием одинаковой средней мощности. Подробно этот вопрос рассматривался выше. Согласно формуле (12), значения периодических импульсов, сопоставляемых с гармонической нагрузкой, приняты

$$Imp_k = 2 \frac{F_{0k}}{\pi \cdot f_F} = 2 \frac{F_{0k} \cdot T_{rep}}{\pi}, \quad (15)$$

т. е.  $Imp_1 = 0,08373T_{rep}$  (кН·с),  $Imp_2 = 5Imp_1$ ,  $Imp_3 = 2,5Imp_1$ .

Для синусоидальных периодических импульсов длительностью  $T_{Imp}$ , согласно формуле (13), их амплитуды выражаются:  $F_{0,1 Imp} = 0,13152T_{rep}/T_{Imp}$  (кН),  $F_{0,2 Imp} = 5F_{0,1 Imp}$ ,  $F_{0,3 Imp} = 2,5F_{0,1 Imp}$ .

В качестве параметров НДС системы рассматривались напряжения в крайнем волокне наиболее опасного сечения (во всех рассмотренных случаях это сечение располагалось у жесткой заделки):

$$\sigma_{eqv}(t) = \frac{M_j(t)}{W_j}. \quad (16)$$

Далее рассмотрим результаты задач, сформулированных выше.

### Задача 1

На рис. 5, 6 приведена зависимость  $\sigma_{eqv}(t)$  в сечении возле заделки при действии периодических синусоидальных импульсов в крайний узел (рис. 3, в) на первой собственной частоте (резонансный случай) при  $T_{rep} = 1/f_1$  и  $T_{Imp} = 0,000001$  с.

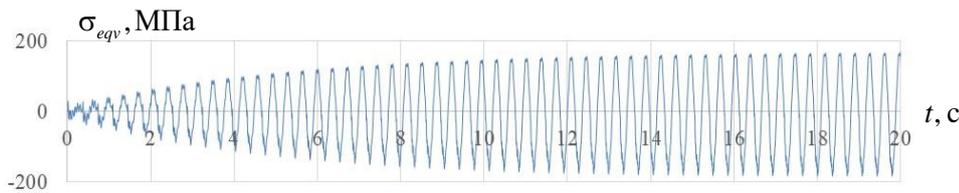


Рис. 5. Зависимость  $\sigma_{eqv}$  от времени при периодических импульсах с частотой повтора, равной первой собственной частоте

Fig. 5. Dependence between normal stress  $\sigma_{eqv}$  and periodic pulse frequency equaling to the first natural frequency

Амплитуда  $\sigma_{eqv}$  в первом периоде действия импульсной нагрузки составила 14 %, а после 45 импульсов достигла уровня 97 % от амплитуды  $\sigma_{eqv}$  при стабилизации процесса колебаний (рис. 6).



Рис. 6. Зависимость  $\sigma_{eqv}$  от времени при периодических импульсах с частотой повтора, равной первой собственной частоте (участок стабилизации амплитуд параметров отклика системы)

Fig. 6. Dependence between normal stress  $\sigma_{eqv}$  and periodic pulse frequency equaling to the first natural frequency (time interval when the system response parameters stabilize)

На рис. 7, 8 приведена зависимость  $\sigma_{eqv}(t)$  в сечении возле заделки при действии периодических синусоидальных импульсов в крайний узел (рис. 3, в) на частоте  $f_F = 0,833f_1$  (где  $f_1$  – первая частота собственных колебаний системы),  $T_{rep} = 1,2/f_1$  и  $T_{Imp} = 0,000001$  с.

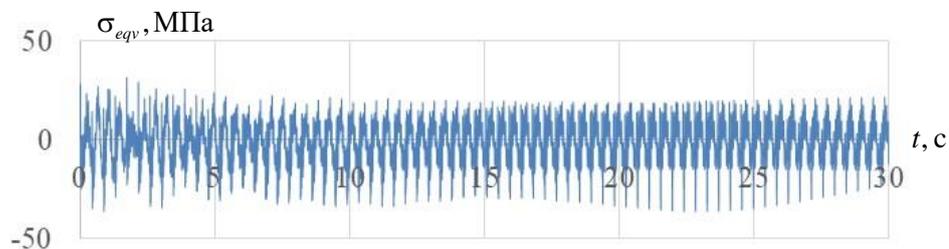


Рис. 7. Зависимость  $\sigma_{eqv}$  от времени при периодических импульсах с частотой повтора, равной 0,833 первой собственной частоты

Fig. 7. Dependence between normal stress  $\sigma_{eqv}$  and periodic pulse frequency of 0.833 of the natural frequency

Максимальная амплитуда  $\sigma_{eqv}$ , начиная с первого периода действия импульсной нагрузки, существенно не изменяется и определяется значением одиночного импульса. Ярко выражены высокочастотные составляющие колебаний. Наблюдается биение амплитуды колебаний.

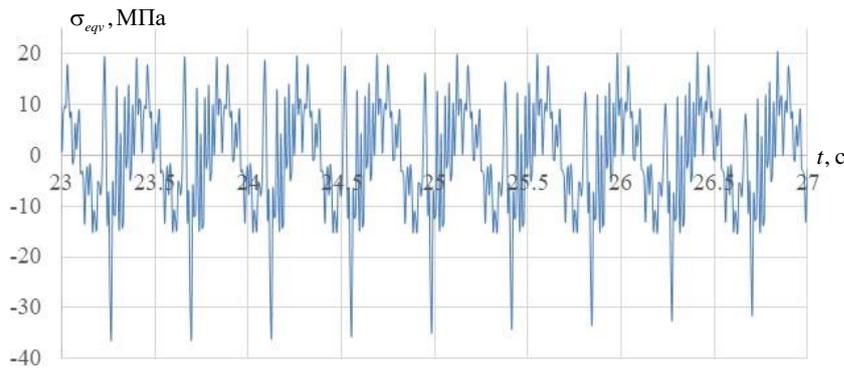


Рис. 8. Зависимость  $\sigma_{eqv}$  от времени при периодических импульсах с частотой повтора, равной 0,833 первой собственной частоты (участок максимальных амплитуд параметров отклика системы)

Fig. 8. Dependence between stress  $\sigma_{eqv}$  and periodic pulse frequency equal of 0.833 of the first natural frequency (time interval when the system response parameters stabilize)

**Задача 2**

На рис. 9 приведена зависимость максимальных амплитуд  $\sigma_{eqv}$  от  $k_{i-r}$  в сечении возле заделки при действии периодических синусоидальных импульсов во все узлы (рис. 3, б) на частоте  $f_F = f_1$  (для наглядности значения  $k_{i-r}$  приведены по убыванию на логарифмической шкале). Пунктиром показаны амплитуды  $\sigma_{eqv}$  при действии гармонической нагрузки. Пересечение графиков соответствует значению  $k_{i-r} = 0,5$  (т. е. при длительности импульса  $T_{imp} = 0,5T_{rep}$ ). При уменьшении  $k_{i-r}$  график имеет асимптотический характер. Значения  $\sigma_{eqv}$  при стремлении  $k_{i-r}$  к нулю (соответствующему мгновенному импульсу) превосходят соответствующие напряжения при гармонической нагрузке на 29 %.

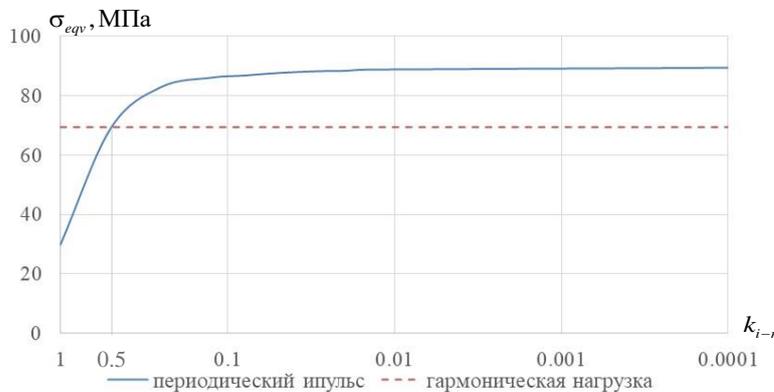


Рис. 9. Зависимость  $\sigma_{eqv}$  от коэффициента  $k_{i-r}$  (частота повтора импульсов равна первой собственной частоте) в сравнении с  $\sigma_{eqv}$  при гармоническом воздействии аналогичной мощности

Fig. 9.  $\sigma_{eqv} - k_{i-r}$  dependence (pulse repetition frequency is equal to the first natural frequency) in comparison with  $\sigma_{eqv}$  dependence under harmonic influence of similar power

### Задача 3

На рис. 10 приведены сравнения АЧХ динамических откликов системы для различных вариантов приложения периодических импульсов. При сравнении результатов действия периодических импульсов на различных частотах учитывались особенности, изложенные выше. Графики 1, 2, 3 (рис. 10) относятся к вариантам приложения нагрузок на рис. 3, б, в, г соответственно. Как и в случае гармонических нагрузок, наибольшие проявления резонансных явлений соответствуют случаю действия нагрузки в крайний узел (рис. 3, в). Такой результат обусловлен тем, что нагрузка приложена в точку системы с наибольшим относительным линейным перемещением как в первой, так и во второй форме колебаний. Следует обратить внимание, что в случае периодических импульсов весьма существенными оказываются резонансные явления на кратных частотах (в частности, на частотах  $0,5f_1$  и  $0,5f_2$ ).

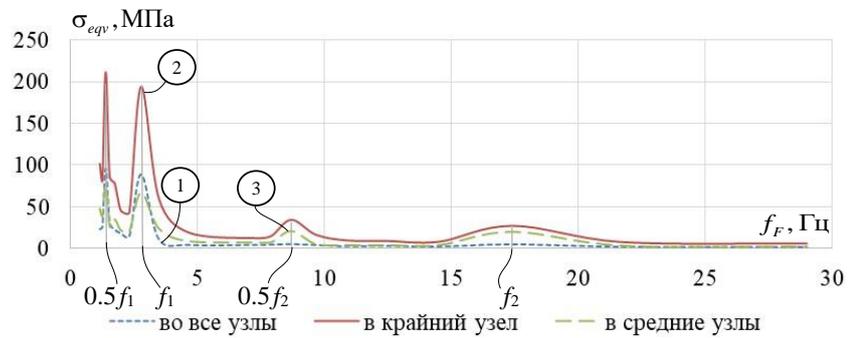


Рис. 10. Зависимость  $\sigma_{eqv}$  от частоты периодических импульсов

Fig. 10. Dependence between  $\sigma_{eqv}$  and periodic pulse frequency

На рис. 11 приведены сравнения АЧХ динамических откликов системы при действии преиодических импульсов (график 1) и при действии гармонической нагрузки (график 2) в крайний узел системы (рис. 3, в, рис. 4, б).

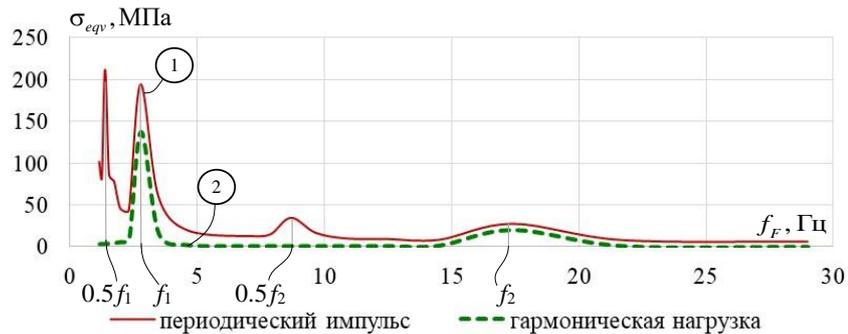


Рис. 11. Зависимость  $\sigma_{eqv}$  от частоты периодической нагрузки (сравнение случая периодических импульсов и гармонической нагрузки)

Fig. 11. Dependence between  $\sigma_{eqv}$  and periodic load (comparison of periodic pulses and harmonic load)

Графики демонстрируют, что резонансные явления на кратных частотах проявляются только в случае периодических импульсов. Для гармонической нагрузки подобные явления не проявляются. Обращая внимание на участок АЧХ в зоне первой частоты, можно наблюдать возрастание резонансных явлений, что объясняется наибольшим на этом участке количеством кратных значений собственных частот.

В зонах нерезонансных случаев периодическое воздействие также вызывает более существенный отклик НДС системы, но это объясняется наличием высокочастотных составляющих в отклике системы, вызывающих всплески амплитуд напряжений (см. рис. 8).

### Основные выводы

1. Периодические импульсные воздействия при постоянном значении отдельных импульсов  $Imp$  в случае резонансного процесса приводят к существенному росту параметров НДС отклика системы с дальнейшей стабилизацией амплитуд и форм откликов системы (во времени) после некоторого числа циклов нагружения.

2. В случае нерезонансного процесса рост параметров НДС отклика системы не наблюдается, а после значительно меньшего числа циклов нагружения также наступает стабилизация амплитуд и форм откликов системы (во времени).

3. В отличие от гармонической нагрузки периодические импульсные воздействия вызывают существенные резонансные явления на частотах, кратных собственным частотам системы.

4. Наиболее опасными для системы с точки зрения амплитуд параметров НДС, при условии одинаковой средней мощности периодических импульсов, являются резонансы на частотах ниже первой собственной частоты и кратных низшим собственным частотам.

5. Амплитуды  $\sigma_{eqv}$  при стремлении длительности периодической импульсной нагрузки к мгновенным импульсам в резонансном процессе на первой собственной частоте оказались существенно выше (на 40 %) аналогичных откликов при гармонической нагрузке той же средней мощности.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Александров А.В., Потапов В.Д., Зылев В.Б. Строительная механика. Книга 2. Динамика и устойчивость упругих систем. Москва : Высшая школа, 2008. 384 с.
2. Клаф Ф., Пензиен Дж. Динамика сооружений. Москва : Стройиздат, 1979. 319 с.
3. Харрис С.М., Крид Ч.И. Справочник по ударным нагрузкам. Ленинград : Судостроение, 1980. 360 с.
4. Справочник по динамике сооружений / под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. Москва : Стройиздат, 1972. 512 с.
5. Ляхович Л.С. Особые свойства оптимальных систем и основные направления их реализации в методах расчета сооружений. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2009. 372 с.
6. Grebenyuk G., Veshkin M., Nosireva O., Maksak V. Stress-strain state analysis and optimization of rod system under periodic pulse load // MATEC Web of Conferences, Tomsk, V. 143. Tomsk : EDP Sciences, 2018. P. 01003. DOI: 10.1051/mateconf/201714301003. EDN: XXUSOT

7. Немировский Ю.В., Мищенко А.В. Динамический расчет систем профилированных композитных стержней // Вычислительная механика сплошных сред. 2015. Т. 8. № 2. С. 188–199. DOI: 10.7242/1999-6691/2015.8.2.16. EDN: TYIRJR
8. Мищенко А.В., Немировский Ю.В. Построение решений задач динамики композитных стержней на основе метода Бубнова – Галеркина // Омский научный вестник. 2015. № 3(143). С. 320–324. EDN: VCNUXZ
9. Дукарт А.В. Задачи теории ударных гасителей колебаний. Москва : Изд-во АСВ, 2006. 205 с.
10. Себешев В.Г., Гербер Ю.А. Регулирование с помощью динамических гасителей колебаний напряженно-деформированного состояния систем с конечным числом степеней свободы при гармонических воздействиях (решение в перемещениях масс с матрицей жесткости) // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 6 (750). С. 5–19.
11. Gerber Yu.A., Sebeshev V.G. Regulation of dynamic stress-strain state and reliability of deformable systems with vibration dampers under harmonic loads // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures. Ural Federal University. 2020. P. 012013.
12. Сильченко О.Б. Анализ автоколебательной упругой обрабатывающей системы под действием периодической импульсной нагрузки в процессе пластичного микрорезания алмазов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2000. № 3. С. 215–216. EDN: MUXBVR
13. Бивзюк В.О., Слынько В.И. Достаточные условия устойчивости линейных дифференциальных уравнений с периодическим импульсным воздействием // Математический сборник. 2019. Т. 210. № 11. С. 3–23. DOI: 10.4213/sm9154. EDN: YKRHRO
14. Гетманова Е.Е. Дискретный спектр частот биений осциллятора при периодическом импульсном воздействии // SWorld : сборник научных трудов. 2013. Т. 3. № 3. С. 10–15. EDN: REPZPN
15. Анашкин О.В., Седова Н.О., Юсупова О.В. Бифуркации периодических решений дифференциального уравнения с импульсным воздействием // Динамические системы. 2017. Т. 7 (35). № 4. С. 395–403. EDN: XТGYAP
16. Митрошин В.А., Мондрус В.Л. Учет ударного воздействия при движении поездов метрополитена в расчете компонентов напряженно-деформированного состояния на контуре тоннельной обделки // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 1. С. 41–48. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.41-48. EDN: MFMJJE
17. Потанов А.Н. Динамический анализ дискретных диссипативных систем при нестационарных воздействиях. Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2003. 167 с.
18. Гребенюк Г.И., Вешкин М.С. Разработка алгоритмов численного расчёта и оптимизации стержневых систем при действии импульсных нагрузок // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4 (45). С. 106–116.

## REFERENCES

1. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Zylev V.B. Construction mechanics. Book 2. Dynamics and stability of elastic systems. Moscow: Vysshaya shkola, 2008. 384 p. (In Russian)
2. Klaf F., Penzien Dzh. Dynamics of structures. Moscow: Strojizdat, 1979. 319 p. (In Russian)
3. Kharris S.M., Krid Ch.I. Impact load handbook. Leningrad: Sudostroenie, 1980. 360 p. (In Russian)
4. Korenev B.G., Rabinovich I.M. (Eds.) Handbook of the dynamics of structures. Moscow: Strojizdat, 1972. 512 p. (In Russian)
5. Lyahovich L.S. Special properties of optimal systems and main directions of their implementation in structural analysis. Tomsk: TSUAB, 2009. 372 p. (In Russian)
6. Grebenyuk G., Veshkin M., Nosireva O., Maksak V. Stress-strain state analysis and optimization of frame structure under pulse-periodic load. *Matec Web of Conferences*. 2018; 143: 01003. DOI: 10.1051/mateconf/201714301003. EDN: XXUSOT (In Russian)
7. Nemirovskij Yu.V., Mishchenko A.V. Dynamic calculation of systems of profiled composite rods. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnyh sred*. 2015; 8 (2): 188–199. DOI: 10.7242/1999-6691/2015.8.2.16. EDN: TYIRJR (In Russian)

8. *Mishchenko A.V., Nemirovskij Yu.V.* Solutions of composite rod dynamics problems based on the Bubnov-Galerkin method. *Omskij nauchnyj vestnik*. 2015; 3 (143): 320–324. EDN: VCNUXZ (In Russian)
9. *Dukart A.V.* Problems of the theory of shock vibration dampers. Moscow: DIA, 2006. 205 p. (In Russian)
10. *Sebeshev V.G., Gerber Yu.A.* Stress-strain state of multi-degree-of-freedom systems under harmonic excitations by means of dynamic vibration dampers. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2021; 6 (750): 5–19. (In Russian)
11. *Gerber Yu.A., Sebeshev V.G.* Regulation of dynamic stress-strain state and reliability of deformable systems with vibration dampers under harmonic loads. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*. 2020. 012013.
12. *Sil'chenko O.B.* Auto-oscillating elastic machining system under periodic pulse load during plastic micro-cutting of diamonds. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*. 2000; (3): 215–216. EDN: MUXBVR (In Russian)
13. *Bivzyuk V.O., Slyn'ko V.I.* Sufficient conditions for stability of linear differential equations with periodic impulse action. *Matematicheskii sbornik*. 2019; 210 (11): 3–23. DOI: 10.4213/sm9154. EDN: YKRHRO (In Russian)
14. *Getmanova E.E.* Discrete frequency spectrum of oscillator beats under pulse-periodic load. In: *SWorld Coll. Papers*. 2013; 3 (3): 10–15. EDN: REPZPN (In Russian)
15. *Anashkin O.V., Sedova N.O., Yusupova O.V.* Bifurcations of periodic solutions of differential equation with impulse action. *Dinamicheskie sistemy*. 2017; 7 (4): 395–403. EDN: XTGYAP (In Russian)
16. *Mitroshin V.A., Mondrus V.L.* Impact during metro train traffic in stress-strain analysis of the tunnel lining contour. *Vestnik MGSU*. 2021; 16 (1): 41–48. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.41-48. EDN: MFMJJE (In Russian)
17. *Potapov A.N.* Dynamic analysis of discrete dissipative systems under non-stationary effects. Chelyabinsk, 2003. 167 p. (In Russian)
18. *Grebenyuk G.I., Veshkin M.S.* Logical design of numerical calculation and optimization of bar systems under dynamic loads. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014; 4 (45): 106–116. (In Russian)

#### Сведения об авторах

*Гребенюк Григорий Иванович*, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003 г. Томск, пл. Соляная, 2, greb@sibstrin.ru

*Вешкин Максим Сергеевич*, канд. техн. наук, доцент, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008 г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, max.vs@list.ru

*Максак Виталий Иванович*, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003 г. Томск, пл. Соляная, 2.

*Жилина Дарья Александровна*, студентка, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008 г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, d.zhilina@sibstrin.ru

#### Authors Details

*Grigori I. Grebenyuk*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solanaya Str., 634002, Tomsk, Russia greb@sibstrin.ru

*Maksim S. Veshkin*, PhD, A/Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, max.vs@list.ru

*Vitali I. Maksak*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solanaya Str., 634002, Tomsk, Russia

*Dar'ya A. Zhilina*, Student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, d.zhilina@sibstrin.ru

#### **Вклад авторов**

*Гребенюк Г.И.* – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста; итоговые выводы.

*Вешкин М.С.* – развитие методологии; разработка расчетных программ и их реализации; выполнение расчетов с их использованием; написание исходного текста; итоговые выводы; набор текста статьи.

*Максак В.И.* – анализ данных; редаKTура.

*Жилина Д.А.* – выполнение расчетов с использованием разработанных расчетных программ; набор текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Authors contributions**

*Grebenyuk G.I.* supervision, conceptualization, methodology; writing; conclusions.

*Veshkin M.S.* methodology; program development and implementation; calculations; writing – original draft preparation; conclusions.

*Maksak V.I.* data curation, editing.

*Zilina D.A.* calculations, writing manuscript.

The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 22.03.2024  
Одобрена после рецензирования 28.03.2024  
Принята к публикации 29.03.2024

Submitted for publication 22.03.2024  
Approved after review 28.03.2024  
Accepted for publication 29.03.2024