

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный  
архитектурно-строительный университет

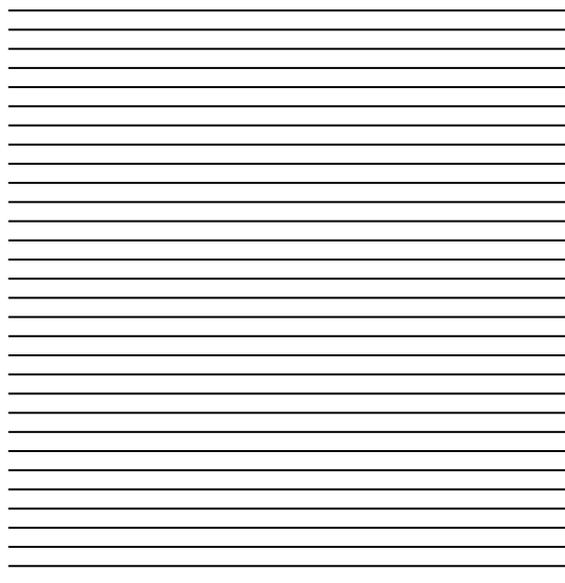
# ВЕСТНИК

ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

Том 26

№ 6 2024  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с апреля 1999 г.



## 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; [nitag@yandex.ru](mailto:nitag@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)  
Галютдинов З.Р., докт. техн. наук, доцент, зав. кафедрой железобетонных конструкций ТГАСУ, г. Томск; [zgaluytdinov@tsuab.ru](mailto:zgaluytdinov@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\\_gis@mail.ru](mailto:ngasu_gis@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 С.В., 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, профессор 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)  
Кумпяк 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@ipu.ru](mailto:valotov@ipu.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. искусствознания, 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; [bagdabtb@yahoo.com](mailto:bagdabtb@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 № 6 – 2024

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

Журнал зарегистрирован 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 23.12.2024. Формат 70×108/16. Гарнитура Таймс.

Дата выхода: 28.12.2024.

Уч.-изд. л. 16,43. Усл. печ. л. 19,51. Тираж 200 экз. Заказ № 107.

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

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

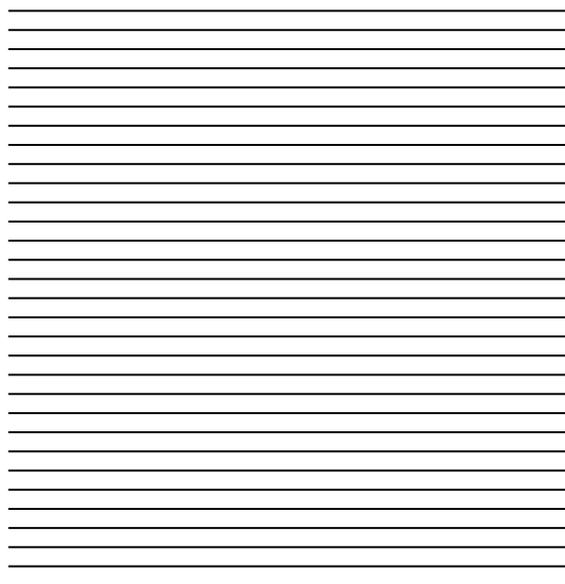
VESTNIK  
TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO  
ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA

**JOURNAL**  
**OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**

Volume 26

№ 6 2024  
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since April 1999



## 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@dfju.ru](mailto:be-ker.at@dfju.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; [eleni@vtomske.ru](mailto:eleni@vtomske.ru)  
Shubenkov M.V., DArts, Professor, Head of Urban Planning Dept., Moscow Architectural Institute (State Academy), RAACS Vice President, Moscow, Russia; [shubenkov@gmail.com](mailto:shubenkov@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 ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA  
JOURNAL OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE № 6 – 2024  
Print ISSN 1607-1859 Online ISSN 2310-0044

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: 23.12.2024. Paper size: 70×108/16. Typeface: Times New Roman Issue date: 28.12.2024.  
Published sheets: 16,43. Conventional printed sheets: 19,51. Print run: 200 copies Price: free.  
Order N 107.

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

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

### АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

<b>Елизарова В.И., Корнев В.И.</b> Промышленные объекты в планировочной структуре города Томска XVII – начала XX в. ....	9
<b>Поляков Е.Н., Полякова О.П., Воевода Ю.Е.</b> Дома-коммуны в архитектурном наследии Ле Корбюзье. «Жилая единица» в Марселе (1945–1952).....	24
<b>Панкратова Д.Р., Смолина О.О.</b> Национальное наследие Якутска и его преемственность в современной архитектуре города .....	44
<b>Вавулин К.Е.</b> Предпосылки к теоретическим основам архитектурной организации открытых пространств в контексте формирования феномена «места»... 58	

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

<b>Курасов О.А., Шредер А.С., Бурков П.В.</b> Влияние динамических процессов на техническое состояние строительных конструкций компрессорной станции .....	71
<b>Конин Д.В.</b> Устойчивость сталежелезобетонных стержней с сердечником в виде двутавра .....	82
<b>Люкшин Б.А., Уцын Г.Е.</b> Анализ возможностей метода неразрушающего контроля армированных изделий из бетона.....	99
<b>Корнеева И.Г., Пинус Б.И.</b> Динамическая устойчивость фиброполипропилен-армированных бетонов .....	112

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

<b>Мананков А.В., Владимиров В.М.</b> Термодинамическая модель кристаллизации ситаллов.....	122
<b>Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Саркисов Д.Ю., Зубкова О.А.</b> Терагерцовая спектроскопия строительных материалов .....	133
<b>Мананков А.В., Рахманова И.А., Владимиров В.М.</b> Возможности применения композиционных материалов с участием наноармирующего и модифицирующего волластонита .....	146

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ,  
АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

**Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д., Черемных А.В., Осипова Е.Ю.**

Совершенствование системы водоотвода с автомобильных дорог  
в Сибирском регионе ..... 160

**Тимоховец В.Д., Чепчугова А.А., Бабич Т.Г.** Изучение влияния перестроений  
транспортных средств на износ верхних слоёв дорожного покрытия ..... 176

**Смирнова О.В., Вин Ко Мьинт Ту.** Адаптивный подход к проектированию  
стальных мостов в Мьянме путем интеграции информационного  
и параметрического моделирования ..... 188

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

**Ерофеев В.И., Хазов П.А., Шкода И.В., Торопов А.С.** Динамические реакции  
сталебетонных стержней при гармонических нагрузках при действии  
продольной силы ..... 201

**Мищенко А.В.** Формулировка критерия минимума энергии деформации  
в физически нелинейных задачах деформирования неоднородных стержней ..... 214

## C O N T E N T S

### ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

<b>Elizarova V.I., Korenev V.I.</b> Industrial Facilities in Tomsk Planning Structure in the 17th and Early 20th Centuries .....	9
<b>Polyakov E.N., Polyakova O.P., Voevoda Yu.E.</b> Communal Houses in Architectural Heritage of Le Corbusier. Unité d'Habitation (1945–1952).....	24
<b>Pankratova D.R., Smolina O.O.</b> National Heritage of Yakutsk and its Traditions in Modern Urban Architecture.....	44
<b>Vavulin K.E.</b> Theoretical Foundations of Open Air Architecture for the Phenomenon of Place .....	58

### BUILDING AND CONSTRUCTION

<b>Kurasov O.A., Shreder A.S., Burkov P.V.</b> Dynamic Processes Affecting Structural Integrity of Compressor Plant.....	71
<b>Konin D.V.</b> Stability of Steel Reinforced Rods with I-Beam Core.....	82
<b>Lyukshin B.A., Utsyn G.E.</b> Exploratory Study of Non-Destructive Testing of Reinforced Concrete Products .....	99
<b>Korneeva I.G., Pinus B.I.</b> Dynamic Stability of Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete.....	112

### CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

<b>Manankov A.V., Vladimirov V.M.</b> Thermodynamic Model of Glass Ceramics Crystallization.....	122
<b>Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P., Sarkisov D.Yu., Zubkova O.A.</b> Terahertz Spectroscopy of Construction Materials .....	133
<b>Manankov A.V., Rakhmanova I.A., Vladimirov V.M.</b> Prospects of Composite Materials with Nanoreinforcing and Modifying Wollastonite.....	146

ENGINEERING AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS,  
AIRDROMES, AND TUNNELS

<b>Lukashevich V.N., Lukashevich O.D., Cheremnykh A.V., Osipova E.Yu.</b> Road Drainage System Development in a Siberian City.....	160
<b>Timokhovets V.D., Chepchugova A.A., Babich T.G.</b> Lane-Change Effect on Road Pavement Wear.....	176
<b>Smirnova O.V., Win Ko Myint Thu.</b> Adaptive Approach to Steel Bridge Design in Myanmar by Integration of Information and Parametric Modeling.....	188

STRUCTURAL MECHANICS

<b>Erofeev V.I., Khazov P.A., Shkoda I.V., Toropov A.S.</b> Dynamic Response of Steel-Concrete Bars at Harmonic and Longitudinal Loads .....	201
<b>Mishchenko A.V.</b> Least Strain Energy in Nonlinear Problems of Bar Nonuniform Deformation.....	214

# АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

## ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 6. С. 9–23.

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 (6): 9–23.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.035

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-9-23

EDN: BXHQUK

### ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОБЪЕКТЫ В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ ГОРОДА ТОМСКА XVII – НАЧАЛА XX В.

**Валерия Игоревна Елизарова, Владимир Иннокентьевич Коренев**

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

**Аннотация.** Актуальность исследования обусловлена непосредственным влиянием последовательного строительства производственных объектов г. Томска на формирование его уникального архитектурно-планировочного образа. Анализ этой взаимосвязи необходим для качественной реновации промышленных территорий города.

**Цель** исследования – выявление, систематизация и анализ промышленных объектов Томска с точки зрения архитектурных особенностей, развития планировочной и организационной структуры для определения их влияния на формирование города в целом. В настоящей статье представлено о становлении промышленности г. Томска дается в контексте социально-экономических, исторических и культурных процессов развития Западной Сибири XVII – начала XX в.

**Методы.** Применение комплексного подхода, включающего анализ литературы, архивных источников, картографического материала и общее натурное обследование объектов, способствовало достижению поставленной цели.

**Результаты** исследования. Установлено, что к началу XX в. территориально-пространственная структура промышленности Томска носила дисперсный характер. Определенная концентрация производственных зданий возникла в северных кварталах. Ряд промышленных объектов разместился в центре, став частью городского пространства. Выявлено 87 промышленных объектов, из которых к настоящему времени сохранилось лишь 37, среди них имеют место заброшенные объекты, остро нуждающиеся в реновации.

**Ключевые слова:** Томск, промышленность, отрасли промышленности, планировочная структура, кирпичный стиль, реновация

*Для цитирования:* Елизарова В.И., Корнев В.И. Промышленные объекты в планировочной структуре города Томска XVII – начала XX в. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 9–23. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-9-23. EDN: BXHQUK

## ORIGINAL ARTICLE

**INDUSTRIAL FACILITIES IN TOMSK PLANNING  
STRUCTURE IN THE 17th AND EARLY 20th CENTURIES****Valeria I. Elizarova, Vladimir I. Korenev***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

**Abstract.** The paper studies the influence of the consistent construction of industrial facilities in Tomsk on the formation of its unique architecture and planning structure. The analysis of this relationship is required for the high-quality renovation of industrial areas.

**Purpose:** The aim of this work is to identify, systematize and analyze industrial facilities of the city of Tomsk in terms of their architecture, development of the planning structure. The industrial development of the city of Tomsk is considered in the context of socio-economic, historical and cultural development of Western Siberia in the 17–20th centuries.

**Methodology/approach:** The integrated approach includes the literature review, archival documents, cartographic material, and field survey of objects.

**Research findings:** It is found that at the beginning of the 20th century, the territory of the Tomsk industry is dispersed. A certain concentration of industrial buildings is observed in northern quarters. A number of industrial facilities locate in the central part, becoming part of the urban space. 87 industrial facilities are identified, of which only 37 have been preserved to date, among which there are abandoned facilities in urgent need of renovation.

**Keywords:** Tomsk, industry, planning structure, brick style, renovation

**For citation:** Elizarova V.I., Korenev V.I. Industrial Facilities in Tomsk Planning Structure in the 17th and Early 20th Centuries. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (6): 9–23. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-9-23. EDN: BXHQUK

Томск был основан в начале XVII в. как важный стратегический центр Сибири, территориально закрепивший расширение границ Московского государства на восток. В 1604 г. на узком высоком мысе (впоследствии названном Воскресенской горой) было закончено строительство деревянной крепости, а в 1605–1609 гг. возведен «верхний» острог – городской посад, где разместились первые поселенцы [1]. Город-острог имел оборонительное значение и должен был защищать местное население от набегов кочевников.

В 1630-х гг. к юго-западу от крепости, под горой (исторический район Пески), был построен «нижний» острог, в том месте, где селились посадские люди, занимавшиеся торговлей, различными промыслами, животноводством и рыбной ловлей. В это время промышленности, в ее привычном представлении, еще не существовало, производство было кустарным, велось на дому или в небольших мастерских.

В XVIII в. город активно разрастается на север, в первую очередь осваиваются прибрежные территории, застройка вдоль р. Ушайки уходит в восточ-

ном направлении, начинает застраиваться Юрточная гора – формируется нерегулярная планировочная структура города, большое влияние на которую оказывают природные особенности местности: рельеф, русло двух рек, болотистая местность. Торговое судоходство все активнее развивается в Томске, на берегу Томи и в устье Ушайки появляются причалы с торговыми складами – первые объекты транспортной инфраструктуры города [2].

Перенос государственной границы Сибири на юг повлиял на то, что Томск потерял свое оборонительное значение, а Сибирский торговый тракт, прошедший через город в середине XVIII в., определил Томск как торговый центр Сибири на многие десятилетия. В начале XIX в. он становится не только административным, но и экономическим центром Томской губернии, в городе активно развивается торговля и налаживается собственное производство. План губернского города Томска 1810 г. дает представление о том, где были организованы первые производства (рис. 1), уже на тот момент постройки были функционально сгруппированы и обособлены от остальной городской застройки.



Рис. 1. Схема расположения промышленных объектов на фрагменте Плана губернского города Томска 1810 г. Выполнено авторами на основе карты из Российского государственного исторического архива, 1810 г.

Fig. 1. Layout of industrial facilities on a fragment of the Tomsk Plan. Made by the authors on the basis of a map from the Russian State Historical Archive, 1810

С 1830 г., после утверждения Проектного плана губернского города Томска, разработанного архитектором В.И. Гесте, для размещения производственных зданий выделяются отдельные кварталы в северной части города (рис. 2) [3].

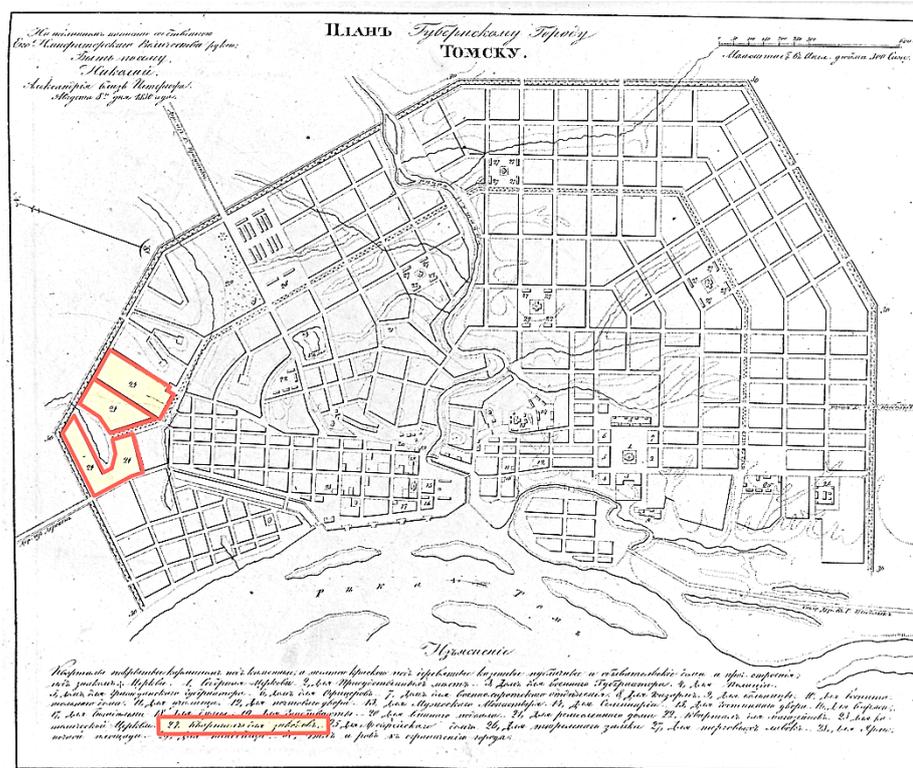


Рис. 2. Кварталы для заводов на Проектном плане Томска, составленном В.И. Гесте, высочайше утвержденном в 1830 г. Обозначения выполнены авторами на основе плана В.И. Гесте [3]

Fig. 2. Plant quarters on the Plan of Tomsk, drawn up by V.I. Geste, highly approved in 1830. Notations is given by the authors based on the plan by V.I. Geste [3]

Относительно темпов формирования промышленной индустрии Томск отличался от крупных российских городов. В то время как промышленный переворот первой половины XIX в. запускает в центральной части России процессы активного переоборудования и строительства новых заводов, использующих машинный способ производства, Томск все еще остается аграрным городом, перед которым совсем не ставятся задачи по наращиванию производственных мощностей.

В 1819 г. при Томском губернском правлении была открыта первая в городе типография (совр. пл. Ново-Соборная, 1), оснащенная всего тремя типографскими станками. Чуть позже началось активное развитие кирпичного производства. Несмотря на то, что в плане В.И. Гесте размещение заводов предусматривалось на северных окраинах города, первые кирпичи начали изготавливать на богатой запасами глины, песка и воды земле восточного склона Воскресенской горы (исторический район Кирпичи). Здесь в деревянных домах селились ремесленники, которые открывали мастерские по изготовлению кирпича. Производство в «кирпичных сараях» было небольшим: сарай для замешивания и фор-

мовки, навес для сушки и печь для обжига. Вплоть до середины XIX в. технология производства была основана на ручном труде, и кирпичные «заводы» не могли выпускать больших объемов продукции [4].

С середины XIX в. техника облегчает процесс изготовления кирпича: появляются кольцевые обжиговые печи, ленточные прессы и глинообрабатывающие машины – увеличивается производительность, одним из главных строительных материалов становится кирпич. В 1873 г. в Томской губернии числилось 44 кирпичных завода, которые производили вторую по объему долю выпуска кирпича в России [5].

Строительство первого в Сибири университета – отдельный этап истории томского кирпичного дела. Специально для его постройки в начале 1880-х гг. были открыты первые крупные механизированные заводы Данилова и Михайлова, земли под их строительство были выделены в южной части города возле глиняных месторождений. Производство активно расширялось и модернизировалось, что позволяло строить из производимых кирпичей не только университет, но и другие здания. В 1896 г. открывается еще один крупный кирпичедельный завод Ивана Некрасова (территория вблизи совр. пл. Южной), он завершает формирование производственного комплекса в южной части Томска. Поздние крупные кирпичедельные заводы повлияли на структуру города, они занимали уже значительно большие территории, чем первые деревянные «кирпичные сараи», и были размещены на новых городских территориях, которые в дальнейшем стали активно застраиваться.

Сооружения в большей степени были каменные, их размеры опирались уже не на человека, а на процессы, происходящие внутри. До наших дней здания практически не сохранились. От завода Пичугина осталась единственная сохранившаяся постройка – одноэтажный кирпичный дом на ул. Косарева, 9, часть усадьбы самого Пичугина, построенная вблизи кирпичного завода. Завод Некрасова просуществовал до 1960-х гг. (рис. 3) и был разобран под новое строительство. А вот завод Михайлова действовал до 2007 г. в стенах Исправительной колонии № 4 под другим названием – Томский завод керамических материалов и изделий (ТЗКМиИ), хотя из дореволюционного оборудования там сохранилась лишь одна кирпичная труба.

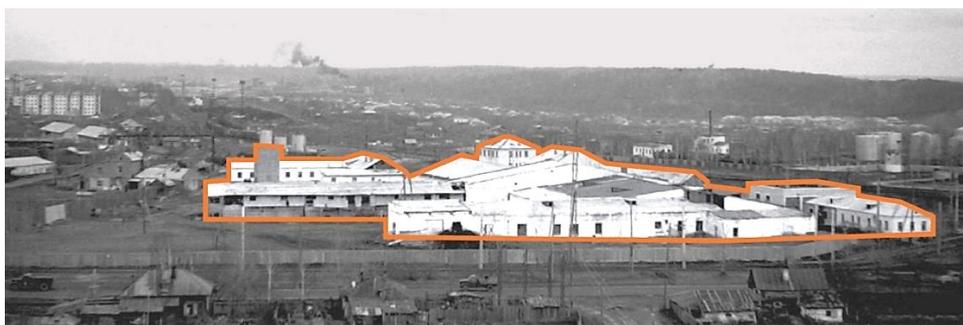


Рис. 3. Кирпичедельный завод Ивана Некрасова, 1968 г., пл. Южная. Фото из архива ТПУ, автор Анатолий Ступаков, 1968 г.

Fig. 3. Ivan Nekrasov brick-making plant, 1968, Yuzhnaya Square. Photo from the TPU archive, by Anatoly Stupakov, 1968

В 1908 г. в Томске было зарегистрировано 62 кирпичных предприятия, а в 1910 г. – 37, что указывает как на снижение количества возводимых в городе каменных построек, так и на увеличение объемов производств крупных механизированных заводов, вытесняющих мелкие производства [6].

В конце XIX в. строятся первые крупные промышленные объекты, которые обладают не только историко-культурной и архитектурной ценностью, но и в дальнейшем оказывают значительное влияние на формирование архитектурно-планировочного облика города. В это время широко развиваются пищевая и лесная отрасли производства, появляются новые объекты транспортной инфраструктуры. Промышленная архитектура этого периода отличалась простотой и лаконичностью форм, которые были основаны на принципах классицизма. В архитектуре промышленных зданий впервые прослеживаются черты «кирпичного стиля», популярного для строительства промышленной архитектуры Сибири конца XIX – начала XX в.

Первый пивоваренный завод города был основан в 1876 г. прусским пивоваром Карлом Крюгером, однако через четыре года на этом месте началось строительство Императорского университета, а пивоваренный завод был перенесен к подножью Острожной горы, на угол Тюремного взвоза (совр. ул. Аркадия Иванова) и Московского тракта. Его трехэтажное кирпичное здание, построенное в 1884 г., после многочисленных ремонтов, реконструкции и модернизации значительно изменилось, но частично сохраняет свой первоначальный облик (рис. 4). На сегодняшний день это одно из старейших предприятий города, которое не только сохранило, но и значительно увеличило объемы своего производства.

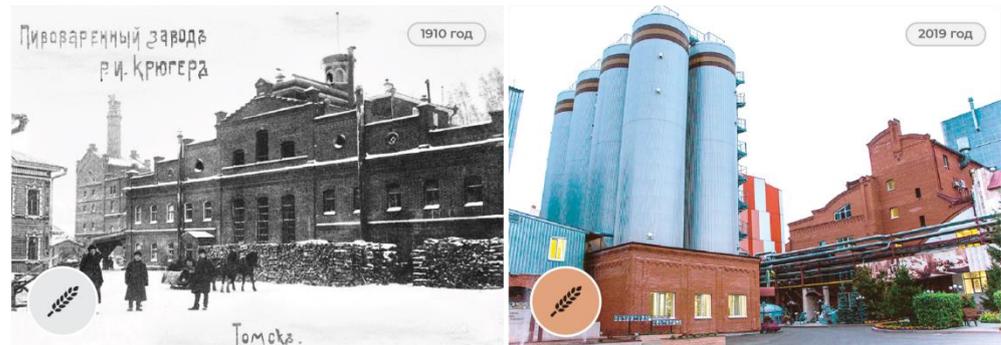


Рис. 4. Пивоваренный завод Крюгера, 1910 г. Фото из архива исторических снимков pastvu.com (слева). «Томское пиво», Московский тракт, 46, 2019 г. (справа)

Fig. 4. Kruger Brewery, 1910. Photo from the archive of historical images pastvu.com (left). "Tomsk beer", 46, Moskovsky Tract, 2019 (right)

К 1912 г. в городе открылось и действовало 6 пивоваренных заводов: К. Крюгера, «Германия» (на берегу р. Ушайки, ул. Украинская), «Вена» (на месте электролампового завода), К.Я. Зеленецкого (угол Киевской и Сибирской улиц), В.П. Чердынцева (в районе пр. Фрунзе, 92) и «Мюнхен» (пр-т Ленина, 185). В настоящее время завод Крюгера продолжает свою деятельность, завод Зеленецкого был перепрофилирован, однако его исторические постройки частично сохранились, остальные сооружения полностью утрачены.

Производства пищевой отрасли того времени все еще организовывались преимущественно на приусадебных территориях. Из этих построек можно выделить комплекс Григорьевского винокуренного завода и Ильинскую мельницу, построенные И.Л. Фуксманом в 1870 г. на р. Ушайке (совр. мкр-н. Степановка, пос. Ново-Карьерный, 1/1). Мельница и жилой дом при ней первые в Томске были освещены электричеством. Из всего комплекса построек сохранилось только одно каменное двухэтажное здание (рис. 5).



Рис. 5. Здание Григорьевского завода, 1890 г. Фото из архива исторических снимков pastvu.com (слева). Пос. Ново-Карьерный, 1/1, 2022 г. (справа)

Fig. 5. Grigorievsky plant in 1890. Photo from the archive of historical photographs pastvu.com (left). Novo-Karyerny village, 2022 (right)

Электростанция, построенная на предприятии Фуксмана, стала отправной точкой для электрификации города, через пять лет в центре, на Конной площади, была запущена первая центральная электростанция в Сибири. Деревянное здание ТЭЦ-1 со временем заменили каменные постройки (рис. 6), которые обеспечивали выработку тепла и электроэнергии до 1988 г. [7]. Сейчас в здании размещено и эксплуатируется оборудование для перекачки сетевой воды, а снаружи – открытое распределительное устройство, обеспечивающее электроэнергией ближайшие микрорайоны города, неиспользуемая часть строения признана аварийной. Здание обладает уникальными чертами промышленной архитектуры, однако оно не было признано объектом культурного наследия, а отсутствие охранного статуса снижает ответственность за его сохранение и качественную реновацию.

В начале 1890-х гг. в Томске действовало 4 заведения по приготовлению дрожжей, но этого производства явно не хватало, дрожжи были дорогими и некачественными. Поэтому в 1895 г. был открыт дрожжево-винокурный завод Д.Е. Зверева (совр. пр-т Ленина, 192), крытое железом кирпичное здание и двухэтажный корпус ректификационного отделения были оснащены паровым двигателем [8]. В настоящее время здания снесены под новое жилое строительство. Завод Зверева стал одним из первых предприятий, которые были размещены на территории исторического района Заозерье.

Исторический район Заозерье, расположенный в северной крайней части города, вблизи Черемошинской пристани и Томской железнодорожной ветки, оказался удобным для размещения промышленных предприятий. В конце

XIX в. в этом районе действовали кожевенные предприятия Н.С. Вильянова, И.А. Еренева, Е.И. Баранова, паровая лесопилка И.М. Иваницкого, городская скотобойня, мыловаренный и свечной заводы О.П. Баранчукова, прядильное заведение Н.П. Баранчукова. Благодаря активному росту фабрик и заводов к концу XIX в. район Заозерье превратился в промышленную зону, что соответствовало разработанной в 1830 г. стратегии развития города [9].



Рис. 6. Здание городской электростанции, 1910 г. Фото из архива исторических снимков pastvu.com (слева). Конная площадь, 2, 2024 г. (справа)

Fig. 6. Power plant, 1910. Photo from the archive of historical images pastvu.com (left). 2, Equestrian Sq., 2024 (right)

Как было отмечено ранее, с расширением торговли в городе начинает налаживаться и собственное производство. В 1910 г. на территории Томского уезда было зарегистрировано 1628 хозяйств, занятых кустарными промыслами разной направленности: щепные, гончарные, пимокатные, ткацкие, кожевенные и скорняжные, большинство из которых имело местное значение. В самом городе широко развивались канатно-прядильный, портняжный, шапочный промыслы. Переход России к индустриальному типу развития отразился и на развитии промышленности Томска: если в 1902 г. в городе насчитывалось 35 фабрично-заводских предприятия, то к 1910 г. их число выросло до 140. Производства располагались при торговых лавках, на приусадебных территориях или прямо в жилых домах, для крупных производств возводились новые здания или целые промышленные комплексы.

Первым градоформирующим промышленным объектом Томска стала спичечная фабрика близ д. Киргизки (совр. микрорайон Спичфабрика), где производство спичек было открыто в 1879 г. Однако индустриальный комплекс, дошедший до наших дней, был сформирован в 1900–1917 гг., после крупного пожара. Новое строительство включало не только производственные корпуса, но и жилые дома и общежития для рабочих, заезжий дом, загородный особняк владельцев производства, церковь с домом священника, где размещалась школа для детей рабочих. Многие объекты спичечной фабрики на разных этапах проектировали П.П. Наранович и К.К. Лыгин – эти постройки выполнены в «кирпичном стиле» [10]. Комплекс спичечной фабрики обладает градостроительной и историко-культурной ценностью, он признан объектом культурного наследия. Тем временем исторический ансамбль находится в процессе деграда-

ции, его объекты постепенно уничтожаются, перестраиваются, частично находятся в аварийном состоянии (рис. 7).

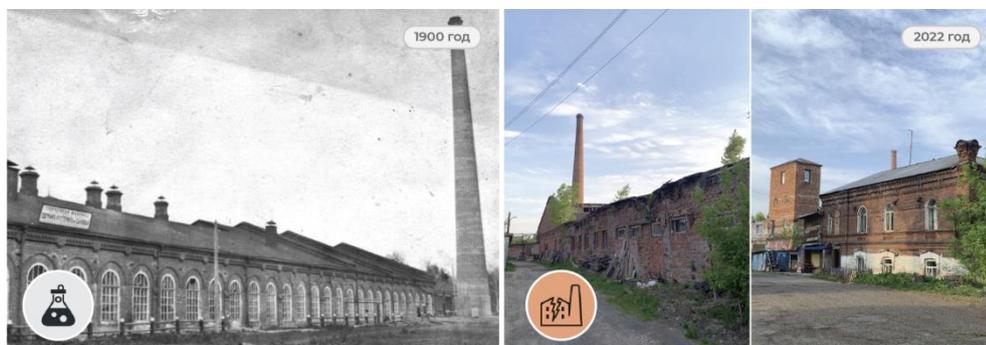


Рис. 7. Комплекс спичечной фабрики «Сибирь», 1900 г. Фото из архива исторических снимков pastvu.com (слева). Мкр-н Спичфабрика, 2022 г. (справа)

Fig. 7. Match factory "Siberia", 1900. Photos from the archive of historical photographs pastvu.com (left). Spichfabrika District, 2022 (right)

В 1902 г. рядом с Лагерным садом строится еще один крупный промышленный комплекс – Казенный винный склад. Комплекс был построен по типовому проекту (такие же можно увидеть в Астрахани, Красноярске, Омске, Иркутске) и включал помещения для хранения, переработки и розлива спирта и водки, а также жилые здания для работников [11]. Комплекс претерпел множество преобразований и реконструкций: над центральным двухэтажным объемом главного корпуса был надстроен третий этаж, практически ко всем зданиям пристроены дополнительные объемы, утрачены элементы фасадов, заложены окна. Однако в целом Томский винный склад сохранился в том виде, каким он был в начале XX в.: практически полностью сохранилась структура комплекса, его территория, основные здания, в том числе жилой двухэтажный дом рабочих, на месте и труба – доминанта комплекса (рис. 8). В настоящее время данный ансамбль – объект культурного наследия.



Рис. 8. Ансамбль Казенного винного склада, 1910 г. Фото из архива исторических снимков pastvu.com (слева). Пр-т Ленина, 1, 2024 г. (справа)

Fig. 8. Wine warehouse, 1910. Photo from the archive of historical images pastvu.com (left). 1, Lenin Ave., 2024 (right)

В 1907 г. на берегу р. Томи купцом Григорием Фуксманом была построена первая в городе мукомольная мельница, краснокирпичные производственные здания которой возведены по проекту томского архитектора А.И. Лангера. А в 1913 г. на соседнем участке паровую мельницу строит купец Кухтерин – первое монолитное железобетонное здание в Сибири (рис. 9). После революции обе мельницы были национализированы и объединены в мельничный комбинат, построена железнодорожная ветка, запущен элеватор, возведены комбикормовый завод и мельзавод, наряду с производственным строительством осуществлялось и жилищное – был построен жилой дом для работников предприятия.

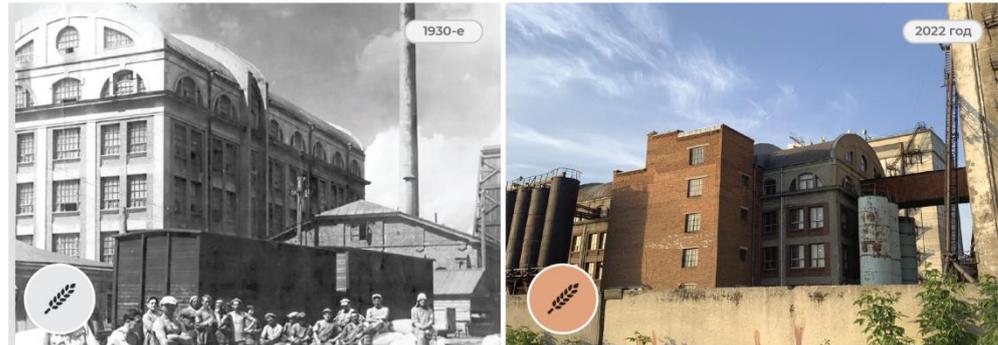


Рис. 9. Паровая мельница купца Кухтерина, 1930 г. Фото из архива исторических снимков pastvu.com (слева). Ул. Мельничная, 40, 2022 г. (справа)

Fig. 9. Kukhterin's Steam mill, 1930. Photo from the archive of historical photographs pastvu.com (left). 40, Melnichnaya Str., 2022 (right)

Таким образом, два точечных производственных объекта были реструктурированы в полноценный производственный комплекс, градоформирующий объект, повлиявший на формирование исторического района Заозерье и его производственной зоны. Сложившиеся объемы комплекса также влияют на восприятие панорамы города с реки. В настоящий момент «Томские мельницы» (совр. ул. Мукомольная, 40) продолжают свое производство, в том числе в реконструированных и модернизированных исторических корпусах, которые являются выявленными объектами культурного наследия.

В этой же «промышленной» зоне Заозерья на берегу реки в 1912 г. по проекту архитектора А. Крячкова строится Томская фабрика по производству карандашных дощечек из сибирского кедра (совр. ул. Войкова, 75). Из всего комплекса построек карандашной фабрики сохранился лишь двухэтажный краснокирпичный исторический корпус, который планируют отреставрировать и адаптировать под отель.

Целлюлозно-бумажные предприятия в этот период активно развивались. Типографский процесс был связан непосредственно с издательским делом, поэтому предназначенные для них здания обычно совмещали внутри несколько функциональных операций. Эти здания отличались особой декоративностью своих фасадов, а также расположением в городе. Все восемь типографий, работавших в 1910 г., были размещены в центре города, они формировали профиль

его главных улиц. В настоящее время эти здания хоть и утратили свою первоначальную функцию, но большинство из них сохранили архитектурный облик, в первую очередь благодаря приобретенному статусу ОКН: Типолитография П.И. Макушина (совр. пер. Батенькова, 5), Типография при газете «Сибирский вестник» (совр. пр. Ленина, 78), Паровая типография Орловой (совр. пер. Нахановича, 3), Сибирское товарищество печатного дела (совр. ул. Гагарина, 9).

В начале XX в. в Томске, помимо вышеупомянутых, активно развивается и пищевая отрасль: появляются первые крупные кондитерские и булочные производства Ф.И. Деева и И.Г. Тихонова, шоколадная фабрика «Бронислав», в городе действуют 14 конфетно-пряничных производств, свыше 7 заводов искусственных минеральных и фруктовых вод, появляется первая в Сибири паровая колбасная фабрика. Эти производства располагаются преимущественно на приусадебных территориях в каменных зданиях, особо не выделяясь среди окружающей застройки.

В этот период активно строится и инженерно-транспортная инфраструктура города. Для функционирования университетов были построены самостоятельные газовые заводы с газгольдерами. Водопроводная сеть в Томске была организована с помощью инженерных сооружений братьев Бромлей: у верхнего перевоза на р. Томи была установлена водонасосная станция с фильтровальным отделением, а в городе построили водонапорную башню и пятнадцать водоразборных будок.

Активное строительство предприятий конца XIX в. происходило в одно время со строительством железнодорожной ветви, соединяющей Транссибирскую магистраль с Томском. Появление скоростного способа передвижения дало возможность гораздо быстрее получать и передавать товары, технологии и информацию, ускоряя тем самым развитие фабрик и заводов. В это же время появляются три главных транспортных узла города: Черемошинская пристань и вокзал, железнодорожный вокзал станции Томск (с 1909 г. Томск-2) и железнодорожный вокзал станции Межениновка (с 1909 г. Томск-1). Здания вокзалов были построены из дерева и до наших дней не сохранили свой первоначальный облик: Черемошинская пристань прекратила свое существование, а железнодорожные вокзалы были перестроены – каменное здание вокзала станции Томск-1 было возведено по проекту архитектора Я.Я. Родюкова (в наст. время ОКН регионального значения), а современный кирпичный вокзал станции Томск-2 был построен в 1997 г.

Таким образом, Томск начала XX в. все еще оставался небольшим уездным городом, где промышленность развивалась лишь в пределах кустарных производств и небольших производственных образований пищевой, лесной и легкой промышленности. Этот факт непосредственно влиял на формирование архитектурно-градостроительного облика города. Типология пространственной организации предприятий со временем расширилась от одного производственного корпуса до производственного комплекса, включающего жилые и общественные объекты. Видоизменялись конструкции и объемы зданий, продиктованные внедрением электроэнергии и нового технического оснащения. Однако заводы и фабрики включались постепенно в городскую среду. Томску удавалось сохранять сомасштабность застройки – большинство про-

мышленных сооружений строилось не выше трех этажей и вписывалось в уже сформированную сетку кварталов, в архитектуре производственных зданий преобладал «кирпичный стиль», перекликающийся с каменной застройкой города. Кустарные производства появлялись и исчезали на приусадебных территориях, безболезненно для городской среды меняя функциональное назначение как построек, так и всего участка. Крупные производства строились на окраинах города, стимулируя его развитие в новых направлениях.

Следуя хронологии развития производственных объектов г. Томска, можно наблюдать следующую динамику численности предприятий города на его разных временных этапах (рис. 10). Согласно данным, полученным из сведений губернского статистического комитета, к 1917 г. наблюдается уменьшение количества предприятий за счет сокращения кустарных производств и наращивания производственных мощностей ключевых предприятий города [12].

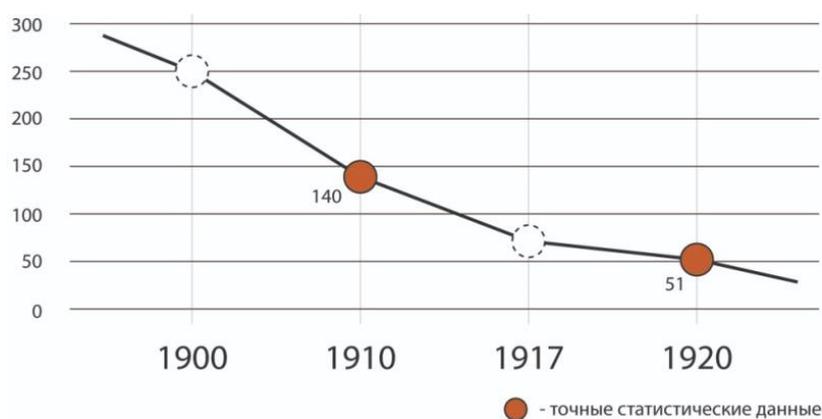


Рис. 10. Динамика численности предприятий г. Томска до 1920 г.  
Fig. 10. The number of enterprises in Tomsk before 1920

В результате проведенного анализа этапов возникновения и размещения промышленных объектов в планировочной структуре города была составлена карта с выявленным местоположением 87 производственных зданий, существовавших в начале XX в. (рис. 11).

Таким образом, исходя из приведенного анализа промышленных объектов г. Томска, можно сделать следующие выводы:

1. Возникновение производственных зданий, их виды и местоположение непосредственно связаны с историческими этапами экономического и градостроительного развития города.

2. На размещение производственных зданий в планировочной структуре Томска большое влияние оказал план Гесте, определивший строительство заводов и производств в северной части города, хотя многие заводы и фабрики размещались по принципу совокупности выгодных производству природно-географических факторов и удобной логистики.

3. К началу XX в. количество мелких кустарных предприятий сокращается и увеличивается число крупных, технически оснащенных производств. Террито-

риально-пространственная структура промышленности носила дисперсный характер. Определенная концентрация производственных зданий возникла в северных окраинных кварталах, однако ряд промышленных объектов разместились в центральной части, став неотъемлемой частью городского пространства.



Рис. 11. Промышленные объекты в структуре Томска до революции 1917 г.

Fig. 11. Industrial facilities in Tomsk before the 1917 Revolution

4. В настоящее время из 87 выявленных объектов сохранилось всего 37. Из них 25 полностью адаптированы под новые функции, и только 7 объектов сохранили свое производство, 5 объектов находятся в заброшенном состоянии и остро нуждаются в реставрации.

5. Из 37 сохранившихся объектов 15 являются объектами культурного наследия. Такая высокая концентрация обусловлена особенностью ранней промышленности Томска – организацией производств при доходных домах и торговых лавках, которые в дальнейшем и стали предметом охраны. Лишь 6 объектов из 15 охраняются именно как промышленные сооружения, еще 3 сооружения также являются выявленными объектами культурного наследия.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Из истории земли Томской* : сб. документов и материалов. Томск, 1978. Вып. 1. 224 с.
2. *Залесов В.Г.* Формирование архитектурного облика города Томска // *Очерки истории томской культуры*. Томск, 2010. С. 18–27.
3. *Российский государственный исторический архив*. Ф. 1293. Оп. 167. Ед. х. 2. Л. 2.
4. *Бурматов Г.И.* Что бывало в Томске? 2-е изд., доп. Томск : Красное знамя, 2009. С. 119–124.
5. *Исторический архив Омской области*. Ф. 3. Оп. 8. Д. 11883.
6. *Смета доходов и расходов* г. Томска на 1911 год. Томск : Паровая типография Н.И. Орловой, 1911. 296 с.
7. *Гитлиц А.И.* Первая в Сибири – Томская центральная электрическая станция / под ред. А.С. Заворина. Томск : Томское книжное изд-во, 1994. 88 с.
8. *Дмитриенко Н.М.* Томский дрожжевой завод. Страницы истории // *Годовой отчет клуба краеведов «Старый Томск»*. Томск, 2005. С. 12–15.
9. *Якимова А.М., Куликова И.В.* Влияние промышленной зоны на функциональное назначение и планировочную структуру исторического района Заозерье г. Томска // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018. Т. 20. № 2. С. 31–41.
10. *Прислонова Д.В.* Этапы формирования комплекса современной спичечной фабрики «Сибирь» в городе Томске (1879–2017 гг.) // *Баландинские чтения*. 2017. Т. 12. № 1. С. 191–196.
11. *Губанов А.В., Борознов С.А.* К вопросу изучения типов объемно-пространственных решений казенных винных складов в конце XIX – начале XX в. // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. 2014. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-izucheniya-tipov-obemno-prostranstvennyh-resheniy-kazennyh-vinnyh-skladov-v-kontse-xix-nachale-hh-v> (дата обращения: 05.12.2024).
12. *Город Томск*. Томск : Издание Сибирского товарищества печатного дела в Томске, 1912. 348, 79, 73 с. Бесплатное приложение к газете «Сибирская жизнь» за 1912 г.

## REFERENCES

1. In: From the History of the Tomsk Land, Collection of documents, Iss. 1. Tomsk, 1978. 13 p. (In Russian)
2. *Zalesov V.G.* The Architecture Formation in Tomsk. In: *Essays on the History of Tomsk Culture*. Tomsk, 2010. Pp. 18–27. (In Russian)
3. Russian State Historical Archive. Form 1293. List 167. Record 2. P. 2. (In Russian)
4. *Burmatov G.I.* What Happened in Tomsk? 2nd ed. Tomsk: Krasnoe Znamya, 2009. Pp. 119–124. (In Russian)
5. Omsk Historical Archive. Form 3. List 8. Record 11883. (In Russian)
6. Estimates of income and expenses in Tomsk for the year 1911. Tomsk, 1911. Pp. 207–208. (In Russian)
7. *Gitlitz A.I.* The First in Siberia Tomsk Central Electric Power Station. A.S. Zavorin, Ed. Tomsk, 1994. 88 p. (In Russian)
8. *Dmitrienko N.M.* Tomsk Yeast Plant. Pages of History. In: *Annual Report of the Club "Old Tomsk" of Local Historians*. Tomsk, 2005. Pp. 12–15. (In Russian)
9. *Yakimova A.M., Kulikova I.V.* Industrial Area Impact on Functioning and Planning Structure of Zaoozer'e Historical Region. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018; 20 (2): 31–41. (In Russian)
10. *Prislonova D.V.* Formation Stages of the Match Factory "Siberia" in the City of Tomsk (1879–2017). In: *Coll. Papers in memory of S.N. Balandin 'Balandin Readings'*. 2017; 12 (1): 191–196. (In Russian)
11. *Gubanov A.V., Boroznov S.A.* Spatial Solutions of State-Owned Wine Warehouses in the 19th and Early 20th Centuries. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2014; (1). Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-izucheniya-tipov-obemno-prostranstvennyh-resheniy-kazennyh-vinnyh-skladov-v-kontse-xix-nachale-hh-v> (accessed December 5, 2024). (In Russian)
12. The City of Tomsk. Tomsk, 1912. Pp. 348, 79, 73. Free supplement to the newspaper "Siberian Life", 1912. (In Russian)

**Сведения об авторах**

*Елизарова Валерия Игоревна*, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, elizarovalerya@yandex.ru

*Корнев Владимир Иннокентьевич*, канд. архитектуры, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, vik.tomsk@rambler.ru

**Authors Details**

*Valeriya I. Elizarova*, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, elizarovalerya@yandex.ru

*Vladimir I. Korenev*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, vik.tomsk@rambler.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 29.11.2024  
Одобрена после рецензирования 01.12.2024  
Принята к публикации 02.12.2024

Submitted for publication 29.11.2024  
Approved after review 01.12.2024  
Accepted for publication 02.12.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 6. С. 24–43.

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 (6): 24–43.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.036

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-24-43

EDN: CJRUHD

## ДОМА-КОММУНЫ В АРХИТЕКТУРНОМ НАСЛЕДИИ ЛЕ КОРБЮЗЬЕ. «ЖИЛАЯ ЕДИНИЦА» В МАРСЕЛЕ (1945–1952)

**Евгений Николаевич Поляков, Ольга Павловна Полякова,  
Юлия Евгеньевна Воевода**

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

**Аннотация.** Статья посвящена одному из наиболее известных проектов многоэтажных жилых зданий, выполненных французским архитектором Ш.-Э. Жаннере-Гри (Ле Корбюзье) в традициях функционализма и брутализма.

«Жилая единица» в Марселе (1945–1952), по словам ее создателя, стала очередным «этапным» произведением в его творчестве. По ее завершении он вошел в плеяду выдающихся современных зодчих, получив возможность свободно экспериментировать с самыми различными архитектурными стилями (модернизм, брутализм и др.).

Авторами проанализированы основные архитектурно-дизайнерские концепции Шарля-Эдуарда, заложенные в решения генерального плана и в планировочные схемы этажей этого необычного здания.

**Ключевые слова:** Франция, Марсель, район Пуасси, Ш.-Э. Жаннере-Гри (Ле Корбюзье), Марсельская «жилая единица», генеральный план, планы этажей

**Для цитирования:** Поляков Е.Н., Полякова О.П., Воевода Ю.Е. Дома-коммуны в архитектурном наследии Ле Корбюзье. «Жилая единица» в Марселе (1945–1952) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 24–43. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-24-43. EDN: CJRUHD

ORIGINAL ARTICLE

## COMMUNAL HOUSES IN ARCHITECTURAL HERITAGE OF LE CORBUSIER. UNITÉ D'HABITATION (1945–1952)

**Evgenii N. Polyakov, Ol'ga P. Polyakova, Yulia E. Voevoda**

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

**Abstract.** The article is devoted to one of the most famous projects of multi-storey residential buildings made in the traditions of functionalism and brutalism by S.-E. Jeanneret-Gree (Le Corbusier), a French architect. According to its creator, the Housing Unit (1945-1952) is the next work

in his creativity. Upon its completion, S.-E. Jeanneret-Gree joined the Pleiades of outstanding modern architects, having the opportunity to freely experiment with a variety of architectural styles (modernism, brutalism). The paper analyzes main architectural and design concepts of Charles-Edouard, implemented in the general and floor plans of this unusual building.

**Keywords:** France, Marseille, Poissy district, S.-E. Jeanneret-Gry (Le Corbusier), Unité d'Habitation, general plan, floor plan

**For citation:** Polyakov E.N., Polyakova O.P., Voevoda Yu.E. Communal Houses in Architectural Heritage of Le Corbusier. Unité d'Habitation (1945–1952). Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (6): 24–43. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-24-43. EDN: CJRUHD

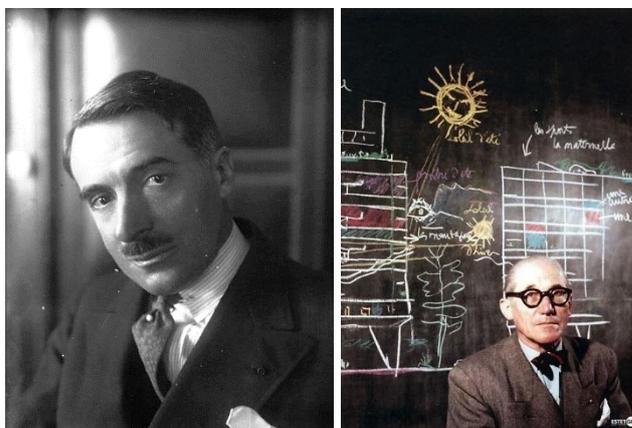
Настоящая статья продолжает серию научных публикаций, посвященных творческому наследию знаменитого французского архитектора Ш.-Э. Жаннерет-Гри (Ле Корбюзье) в области жилищного строительства [1, 2, 3]. После окончания Второй мировой войны он активно занялся восстановлением разрушенных городов и разработкой уникальных версий жилых блоков и комплексов для людей, оставшихся без крова [4]. При этом особое внимание он уделял социальным аспектам, корректировке образа жизни своих современников, их духовному единению: «Идея создать идеальный формат жилья для современного человека занимала Корбюзье с самого начала карьеры. Годы теоретических изысканий и кропотливого труда воплотились в проект Марсельской "жилой единицы"...» [5].

В послевоенный период страны Западной Европы столкнулись с беспрецедентным жилищным кризисом. Жилая застройка Марселя получила серьезные разрушения в результате массированных бомбардировок в 1940 и в 1944 гг. В результате многие тысячи горожан остались без крова. Поэтому в 1945 г. министр реконструкции и городского развития Франции Рауль Дотри (рис. 1) поручил Ле Корбюзье организовать строительство в Марселе жилого комплекса для бездомных семей. Он предложил архитектору разработать проект жилого комплекса, включающего 20–30 индивидуальных жилых домов на побережье Средиземного моря. Ле Корбюзье дал согласие на этот заказ при обязательном условии освободить его от подчинения действующим нормативам. Рассмотрим, чем все это было обусловлено.

Напомним, что в начале своей профессиональной карьеры Шарль-Эдуард в основном занимался проектированием частных особняков (вилл) и поселков (Фрюже, Вейсенхоф и др.). Но на этот раз он разработал проект монументального жилого комплекса в 17 этажей, рассчитанного на принципиально новую форму проживания. В 337 квартирах этой колоссальной «жилой единицы» (*фр.* Unité d'Habitation) могли со всеми удобствами разместиться 1600 человек (рис. 2).

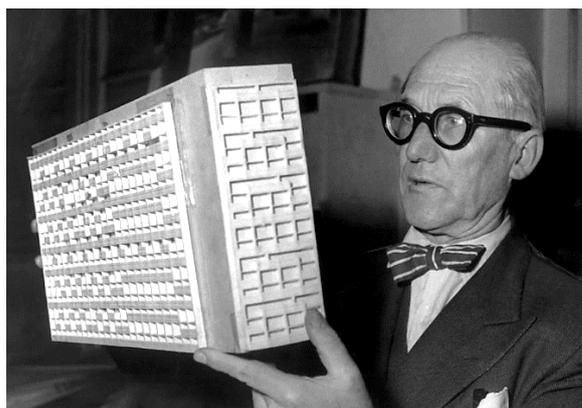
Не исключено, что источником вдохновения мастеру послужили уникальные для того времени градостроительные концепции советских архитекторов-авангардистов (М.Я. Гинзбурга, А.А. Веснина, Н.Д. Колли и др.), с которыми он общался во время своих визитов в СССР в 1928–1932 гг. (строительство офисного здания Центросоюза на ул. Мясницкой, 39). Ле Корбюзье задумал создать уникальный жилой комплекс, из которого можно будет не выходить. В нем должно быть предусмотрено всё, что необходимо жильцу: библиотека, прачечная, ресторан, кинозал, магазин и пр. Подобный дом становится похожим на

круизный лайнер, в котором каждый пассажир спит в своей каюте, а вся общественная жизнь протекает на палубах<sup>1</sup>.



*Рис. 1.* Министр реконструкции и городского развития Франции Рауль Дотри (1880–1951) (слева)<sup>2</sup>; Ле Корбюзье, его эскизы «жилой единицы» в Марселе<sup>3</sup> (справа)

*Fig. 1.* Raoul Dautry (1880–1951), the French Minister of Reconstruction and Urban Development. On the right – Le Corbusier, his sketches of Unité d'Habitation



*Рис. 2.* Ле Корбюзье с рабочей моделью «жилой единицы»<sup>4</sup>

*Fig. 2.* Le Corbusier with a working model of Unité d'Habitation

Завершенная версия проекта включала 2785 чертежей, что говорит о глубине и детальности его проработки. Основная концепция его автора: «Если вы стремитесь жить с вашей семьей в обстановке душевной дружбы, в тишине и покое, среди природы, объединяйтесь по 2 тыс. человек (мужчин, женщин и детей), входите в дом через одну дверь, пользуйтесь четырьмя лифтами, вмещаю-

<sup>1</sup> Лучезарный город Ле Корбюзье: прорыв или утопия? (часть 1) // livejournal. URL: <https://agritura.livejournal.com/275976.html?ysclid=lxylplq64d873879612>

<sup>2</sup> URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Raoul\\_Dautry#/media/File:Dautry\\_1928.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Raoul_Dautry#/media/File:Dautry_1928.jpg)

<sup>3</sup> URL: <https://i.pinimg.com/736x/49/92/0c/49920c51e7b1d11d389459de07b31c0b-le-corbusier-argentine.jpg>

<sup>4</sup> URL: [https://corbusier.totalarch.com/files/gallery/photo\\_lc\\_001.jpg](https://corbusier.totalarch.com/files/gallery/photo_lc_001.jpg)

щими по 20 человек, которые доставят вас в любую из восьми внутренних улиц, расположенных одна над другой. Там вы будете жить в уединении и тишине; солнце, воздух и зелень заполнят ваши окна. Дети ваши будут играть на траве или в саду на крыше дома...» [6].

Генеральный план жилого комплекса был предельно лаконичен. Вокруг дома разбит тенистый парк. Здесь устроены детская площадка и площадка для выгула собак. Ранее здесь были и общие огороды (рис. 3).

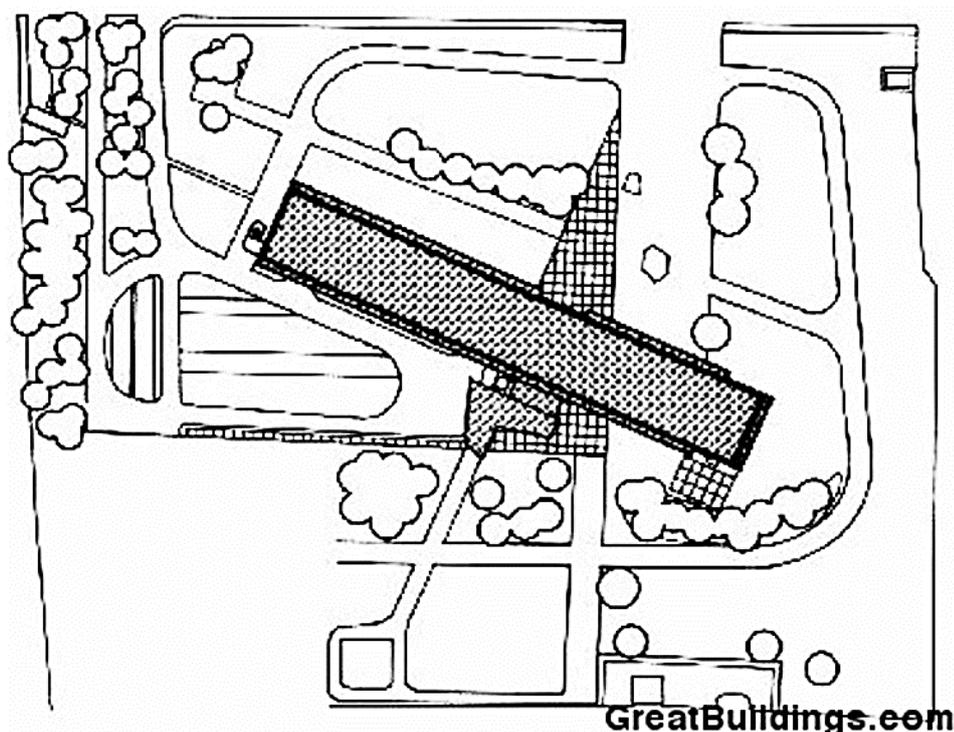


Рис. 3. Генеральный план Марсельской «жилой единицы»<sup>5</sup>  
Fig. 3. General plan of Unité d'Habitation

Марсельская «жилая единица» (*фр.* Unité d'Habitation) (1945–1952) расположена посреди парка на бульваре Мишле, 280 (280 Boulevard Michelet). Ее продольная ось имеет меридиональную ориентацию (С – Ю): «В северном торце здания большая бетонная плита служит защитой от сильного северного ветра – мистрала, а также фоном для театральных представлений на открытом воздухе...» [6]. Узкий южный торец здания также наполнен жилыми квартирами («ячейками») (рис. 4, 5).

На северном фасаде, лишенном окон, предусмотрена винтовая лестница. По ней можно сразу же, минуя нижний ярус жилых этажей, подняться в общественную зону, наполненную магазинами и прочими общественными заведениями (рис. 6, 7).

<sup>5</sup> URL: <https://i.pinimg.com/736x/2a/a2/b1/2aa2b19650d81de8abd8c355fe246f20.jpg>

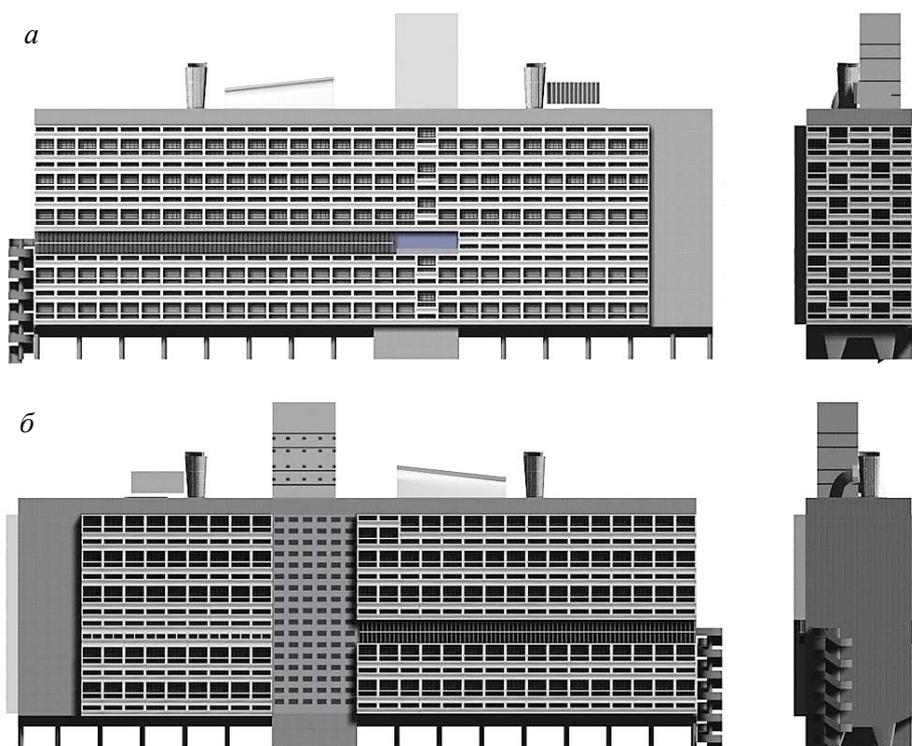


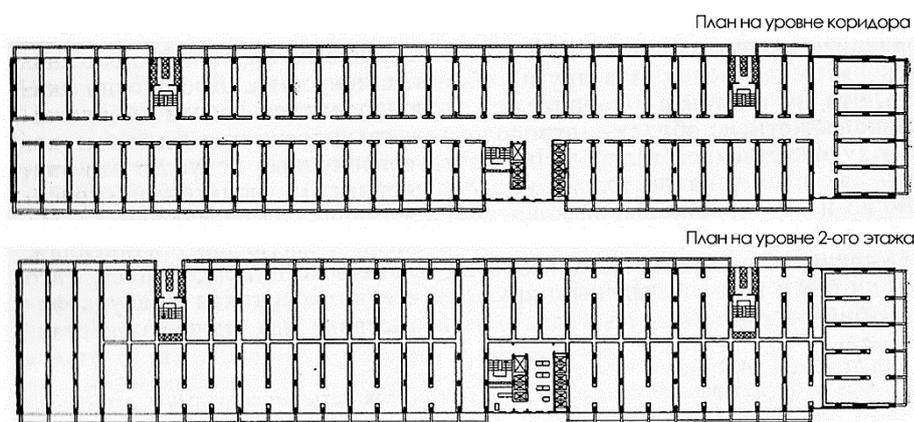
Рис. 4. Основные фасады Марсельской «жилой единицы»<sup>6</sup>:  
 а (слева направо) – западный и южный; б (слева направо) – восточный и северный  
 Fig. 4. West-south (a) and east-north (b) facades of Unité d'Habitation



Рис. 5. Основные фасады Марсельской «жилой единицы»<sup>7</sup>  
 Fig. 5. Main facades of Unité d'Habitation

<sup>6</sup> URL: <https://inartdeco.com/wp-content/uploads/2022/02/ZHilaya-Edinica.jpg>

<sup>7</sup> URL: <https://inartdeco.com/wp-content/uploads/2022/02/ZHilaya-Edinica.jpg>



Ле Корбюзье "Юните'Д'Абитасьон"  
(жилая единица), Марсель, 1948-1954 гг.

Рис. 6. Планы нижних этажей Марсельской «жилой единицы»<sup>8</sup>  
Fig. 6. Lower storeys of Unité d'Habitation



Рис. 7. Северный фасад Марсельской «жилой единицы». Видовые точки<sup>9</sup>  
Fig. 7. North Facade of Unité d'Habitation

Боковые фасады комплекса обращены на запад и восток: «Здание поставлено так, что летом в средиземноморскую жару в квартирах прохладно. С од-

<sup>8</sup> URL: [https://kannelura.ru/dr/hits\\_41\\_02.jpg](https://kannelura.ru/dr/hits_41_02.jpg)

<sup>9</sup> URL: [https://studfile.net/html/2706/164/html\\_P\\_mtMt8V5y.E6EQ/htmlconvd-8Z0qEM\\_html\\_24a2de5e55831781.jpg](https://studfile.net/html/2706/164/html_P_mtMt8V5y.E6EQ/htmlconvd-8Z0qEM_html_24a2de5e55831781.jpg); <https://i0.wp.com/archeyes.com/wp-content/uploads/2023/09/L-Unité-d-Habitation-de-Marseille-Le-Corbusier-Apartments-France-Concrete-ArchEyes-cemal-emden-ext-11.jpg?ssl=1>

ной стороны окна выходят на Средиземное море, а с противоположной видны поросшие лесом горы и холмы...» [7].

Соединение отдельных «жилых единиц» в общий многоэтажный блок имело два больших преимущества: «Во-первых, из всех квартир открывался прекрасный вид на море, что в ином случае оказалось бы привилегией лишь нескольких счастливых домов (расположенных у кромки побережья), и, во-вторых, "жилая единица" предоставляла каждому жильцу намного больше удобств, чем обычные дома...» [8] (рис. 8).



Рис. 8. Видовые точки генерального плана Марсельской «жилой единицы»<sup>10</sup>

Fig. 8. General Plan of Unité d'Habitation

Для того чтобы понять, о каких жизненных «удобствах» идет речь, рассмотрим функциональную структуру данного комплекса: «Корбюзье считал, что идеальный дом должен быть "машиной для жилья", все элементы которой слаженно работают для обеспечения удобства и комфорта всех жителей. В Марсельской "жилой единице" он заложил инфраструктуру, позволяющую его жителям при желании существовать автономно...» [6].

<sup>10</sup> URL: <https://i.pinimg.com/originals/5d/71/9b/5d719bbb043f7ac1e557eba4617bfee2.jpg>

Многэтажное здание включает в себя четыре функциональные зоны, занимающие его различные высотные уровни:

1. Наземный уровень (опорная структура).
2. Жилая часть, включающая пять низких коридоров («внутренних улиц») и жилые «ячейки» (одно- и двухуровневые квартиры) обитателей этого комплекса (1–6-й и 9–17-й этажи).
3. «Торговая улица», занимающая 7–8-й этажи.
4. Плоская крыша-сад, предназначенная для активного отдыха жильцов.

Начнем обзор с самого нижнего, наземного, уровня – *опорной структуры* здания. Каждая из массивных опор, чуть наклоненных внутрь и расширяющихся кверху, воспринимает нагрузку около 2000 т (рис. 9).

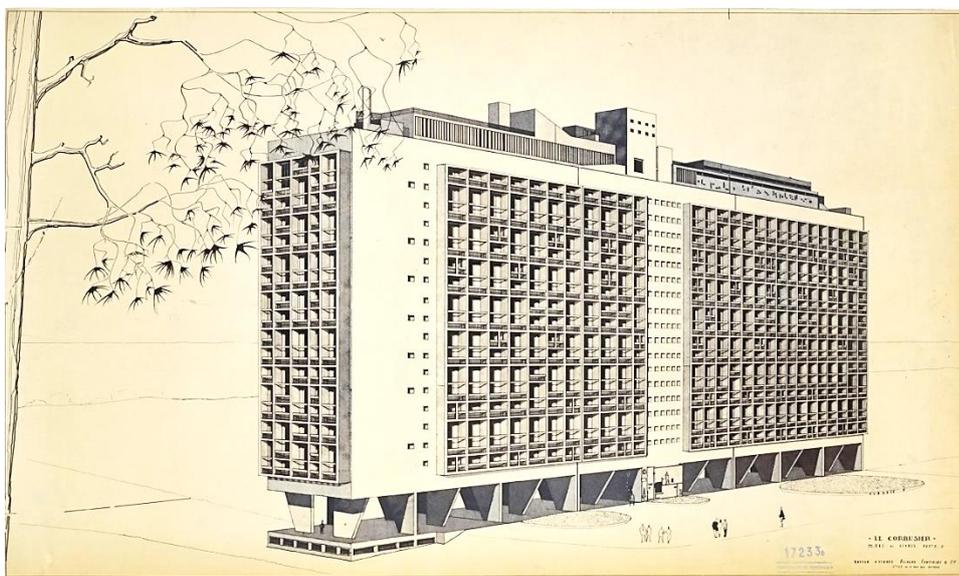


Рис. 9. Видовая точка южного и восточного фасадов (чертеж)<sup>11</sup>  
Fig. 9. South and West Facades of Unité d'Habitation

С помощью широкой расстановки опор, растущих рядом с ними деревьев и аккуратно подстриженных газонов Ле Корбюзье «умудрился передать удивительное ощущение мощи, пролады и спокойствия, свойственное скорее дубовой роще, чем основанию крупного жилого дома...» [7]. Под ним образуется прохладное свободное место в тени, что очень актуально в обычно солнечном Марселе. Прекрасные сады вокруг здания сегодня превратились в паркинг (место, отведенное под стоянку автомобилей, велосипедов и прочего транспорта) (рис. 10).

Проанализируем объемно-планировочную структуру этого здания. Помимо жилых ячеек, Марсельская «жилая единица» имеет шесть широких коридоров, расположенных один над другим и проходящих вдоль центральной длинной оси каждого третьего по счету этажа здания. Пять из них именуется «*внутренними улицами*»: «Их пластическая сложность создается цветной по-

<sup>11</sup> URL: <https://lecorbusier-worldheritage.org/wp-content/uploads/2019/09/02-plan-flc-17233b.jpg>

краской стен, заглублением входных дверей и ящиками для операций со стиркой белья. Из коридора можно войти в две двухэтажные квартиры... Все искусственно освещенные длинные переходы "внутренней улицы" были окрашены в яркие цвета, чтобы сделать их более привлекательными» [6] (рис. 11).



Рис. 10. Опорная структура Марсельской «жилой единицы» в роли автостоянки<sup>12</sup>  
 Fig. 10. Supports of Unité d'Habitation

Две низкие и длинные «внутренние» улицы» размещены между 1-м и 6-м этажами. Они очень похожи на «сквозные» коридоры типовых студенческих общежитий, строившихся в нашей стране в период социализма. Над ними расположена так называемая «торговая улица», о которой будет сказано ниже. Выше, между 9-м и 17-м этажами, размещены еще три «внутренние улицы», также предназначенные для жильцов этого комплекса.

<sup>12</sup> URL: <https://probauhaus.ru/wp-content/uploads/2015/03/Gorod-vnutri.-ZHilaya-edinitsa-ot-Korbyuz-e-www.probauhaus.ru-8.jpg>; <https://corbusier.totalarch.com/files/build/043/019.jpg>



Рис. 11. «Внутренняя улица» – коридор, ведущий в «жилые ячейки» нижнего яруса здания<sup>13</sup>  
Fig. 11. Corridor in Unité d'Habitation leading to living cells of the lower tier

В данном проекте Ле Корбюзье постарался реализовать свою стратегическую концепцию «вертикального города-сада», над которой он и его сотрудники работали с 1925 г. («План Вуазен» и др.). Все обитатели Марсельской «жилой единицы» должны были в полной мере ощутить духовное единство со своими соседями. С этой целью в северной половине дома на 7-м и 8-м этажах была создана двухуровневая «Торговая улица», включающая самые различные жилые блоки (гостиница на 10 номеров, отель «Le Corbusier») и заведения для организации торговли (овощной, гастрономический, табачный и парфюмерный магазины), общественного питания (ресторан «Le Ventre de l'Architecte» – «Чрево архитектора»). В разные годы здесь функционировали отделения бытового обслуживания (почтамт, парикмахерские, прачечная, аптека, газетный киоск, кабинеты врачей и нотариусов), а также кинотеатр, библиотека, коммунальные службы. Приведем восторженный отзыв посетителей «Торговой улицы»:

«Это – совершенно удивительный элемент Марсельского блока. Из низких коридоров с приглушенным электрическим светом житель, находясь внутри своего дома, неожиданно попадает в светлое городское пространство с небольшими кафе и барами...» [6].

Этот срединный общественный центр – совершенно поразительное изобретение автора. Идея заключалась в том, чтобы дать счастливым обитателям

<sup>13</sup> URL: <https://probauhaus.ru/wp-content/uploads/2015/03/Gorod-vnutri.-ZHilaya-edinitsa-ot-Korbyuz-e-1.jpg>

«машины для жизни» возможность пользоваться всеми благами современного города, не выходя во внешний мир. Социализация же жильцов в процессе этого должна была способствовать формированию единого коллектива, коммуны – идея, подсмотренная Корбюзье у советских архитекторов-авангардистов во время его визитов в СССР (рис. 12).

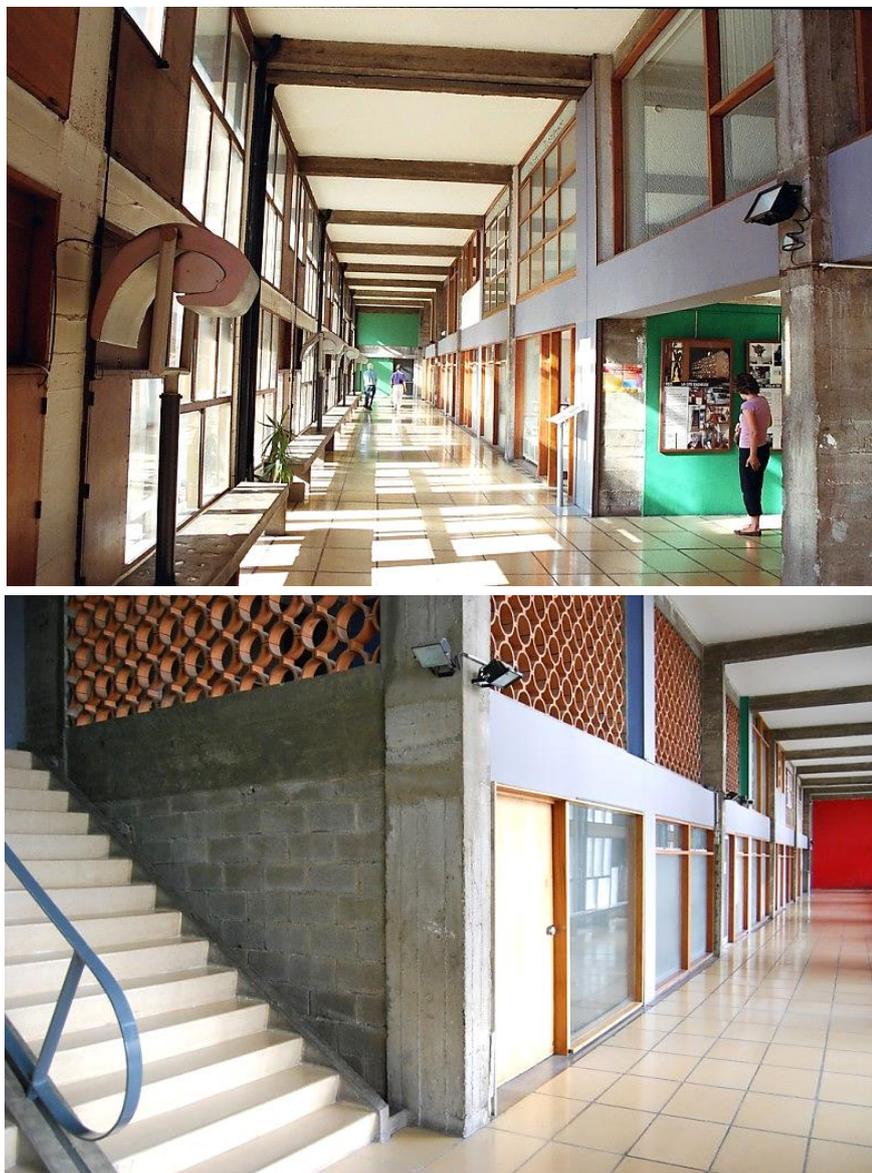


Рис. 12. «Торговая улица». Видовые точки<sup>14</sup>  
Fig. 12. Commercial street in Unité d'Habitation

<sup>14</sup> URL: <https://probauhaus.ru/wp-content/uploads/2015/03/Gorod-vnutri.-ZHilaya-edinitsa-ot-Korbyuz-e-6.jpg>

Следует отметить, что Ле Корбюзье оградил «Торговую улицу» от окружающей среды единым ленточным окном, которое выделил на внешнем фасаде ритмичкой узких вертикальных ребер. Изящная решетка не только защитила внутренние помещения от лучей палящего солнца, но также сделала более выразительным суровый бетонный фасад комплекса (рис. 13).

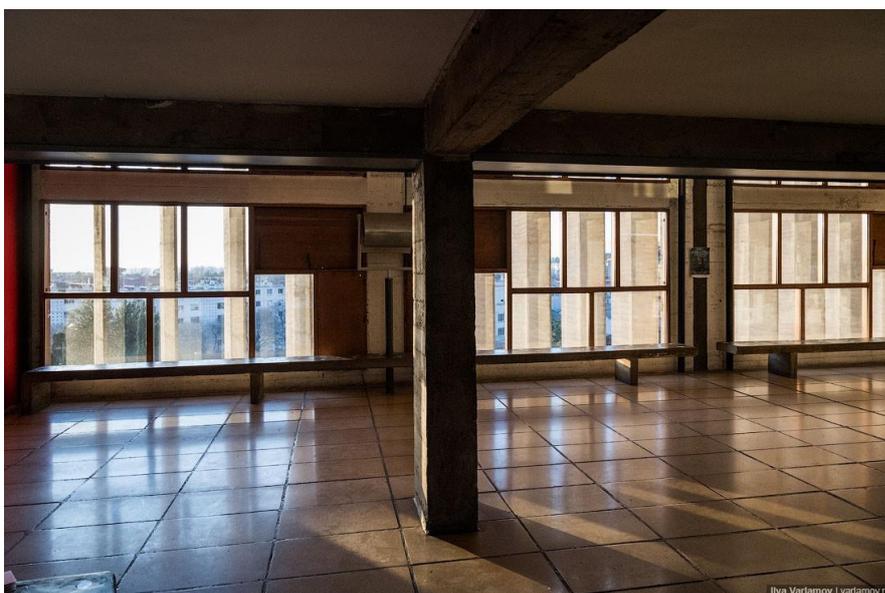


Рис. 13. Ритмическая бетонная решетка на ленточных окнах «Торговой улицы»<sup>15</sup>

Fig. 13. Rhythmic concrete lattice on ribbon windows in the Commercial street

<sup>15</sup> URL: [https:// probauhaus.ru/wp-content/uploads/](https://probauhaus.ru/wp-content/uploads/); <https://i.pinimg.com/originals/2c/f1/3e/2cf13efc3bcaa4863c090e4ae022b90a.jpg>

Попробуем теперь оценить специфические решения интерьеров жилых квартир этого уникального здания (рис. 14): «Все здание собрано из типовых элементов... весьма оригинальным образом: вначале возвели гигантский железобетонный каркас-клетку, в который "задвинули", будто бутылки, типовые железобетонные элементы заводского производства. Каждый такой элемент, вставлявшийся насквозь по ширине дома, содержал в себе две двухуровневые квартиры, "обнимающие" часть коридора» [5].

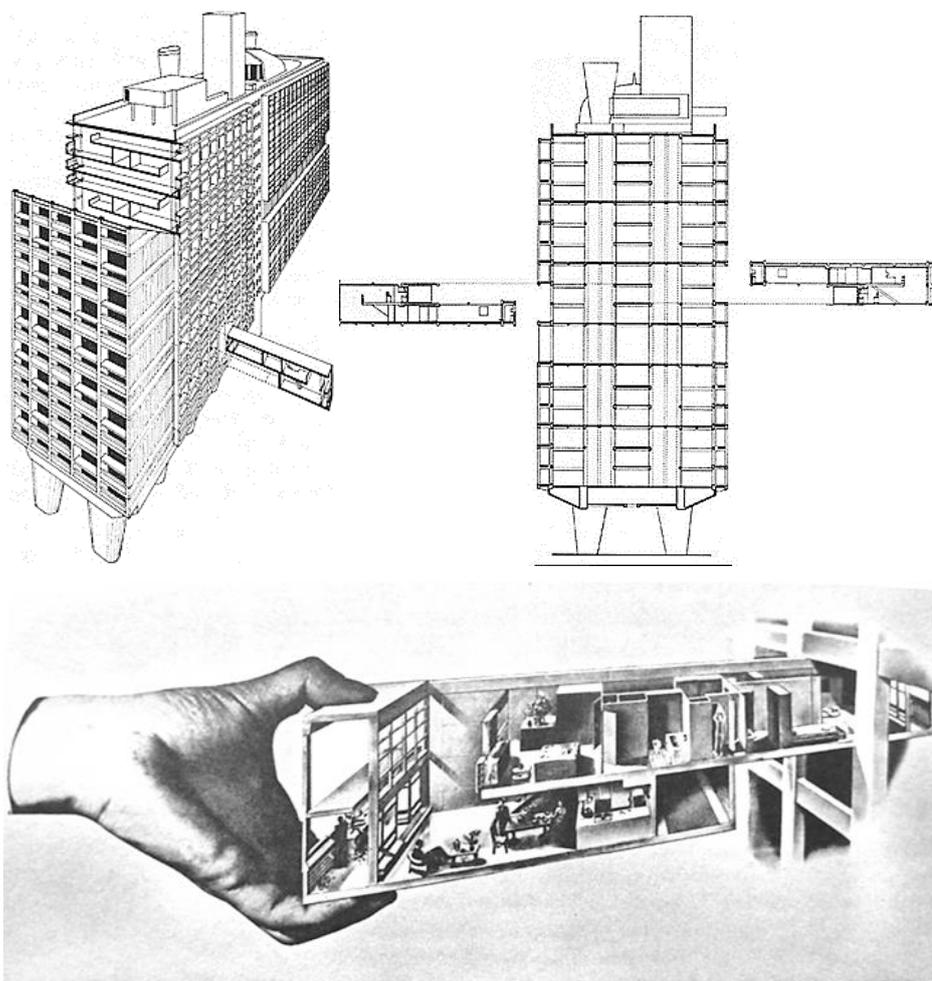


Рис. 14. Схема монтажа двухуровневых квартир-дуплексов<sup>16</sup>

Fig. 14. Schematic of two-level duplexes

«Таким образом, все квартиры-дуплексы (одноуровневыми были только студии) стандартно имели двухсветные гостиные, глубокие лоджии, защищав-

<sup>16</sup> URL: <https://content.onliner.by/news/1100x5616/91503c00648425ac5cfaf36ed8cd3aa8.jpeg>; <https://i.pinimg.com/736x/66/74/ac/6674ac89ffd683806e5f1b5ea5539ee6.jpg>; <https://agritura.livejournal.com/275976.html?ysclid=lxylplq64d873879612>

шие жильцов от палящего марсельского солнца, и выходили окнами на оба фасада дома. Эта революционная технология позволяла ускорить и удешевить строительство, при этом стандартная конфигурация квартир уравнивала всех жильцов в статусе...» [5].

«Дом этот имеет высоту в 17 этажей и включает в себя 337 квартир-апартаментов, которые поделены на 23 разных типа: есть квартиры для больших семей, есть для маленьких, а есть и вовсе для холостяков... Все квартиры в доме двухуровневые. Входы в эти квартиры осуществляются из пронизывающих все здание коридоров...» [9] (рис. 15).

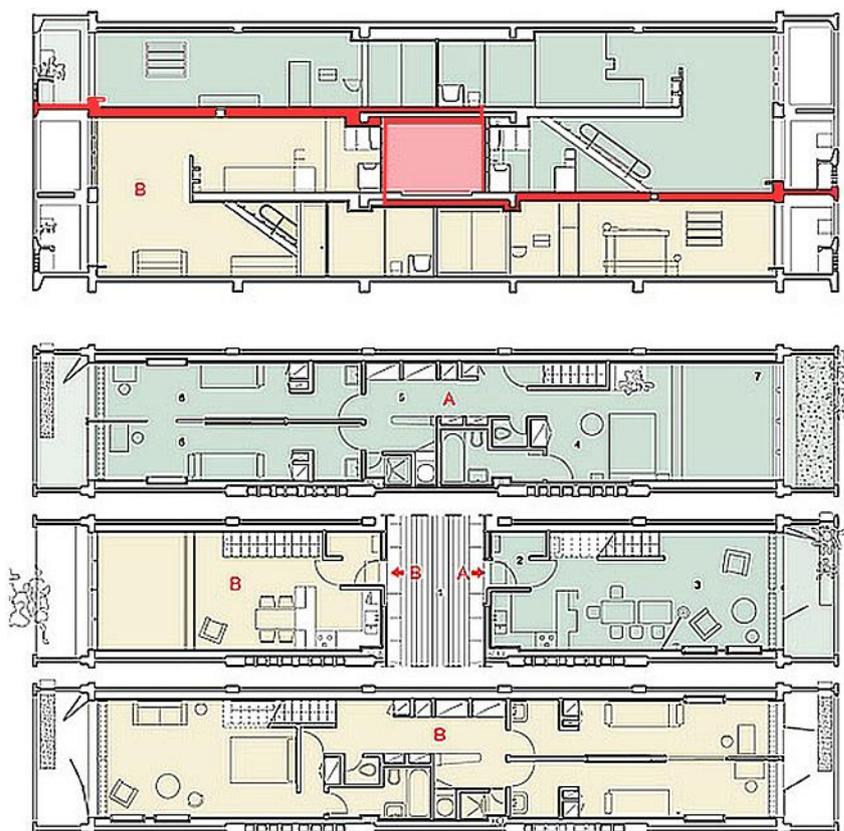


Рис. 15. Жилые ячейки Марсельской «жилой единицы»<sup>17</sup>

Fig. 15. Living cells in Unité d'Habitation

«Вместо традиционной двухуровневой планировки Ле Корбюзье выбрал коридоры через каждые два этажа, что позволяет эффективно использовать каждую "внутреннюю улицу" на нескольких уровнях. Такое стратегическое расположение в сочетании с использованием лифтов и аварийных лестниц способствует как эффективному передвижению, так и социальному взаимодействию... Единое

<sup>17</sup> [https://ic.pics.livejournal.com/windw/15218307/448905/448905\\_original.jpg](https://ic.pics.livejournal.com/windw/15218307/448905/448905_original.jpg)

жилое пространство остается непревзойденным достижением, воплощающим видение Ле Корбюзье новой формы коллективного жилья...» [10].

«Исходный принцип – связь между индивидуальным и коллективным – восходит к впечатлениям, полученным Ле Корбюзье во время путешествия на Восток (1907 г.), от монастырей Афона и монастыря Валь д' Эма в Тоскане. 337 ячеек "жилой единицы", подобно монашеским кельям, должны обеспечить индивидуальную приватность для каждой семьи, в сочетании с возможностью включиться в деятельность коллектива... Дом, таким образом, создавался и по образцу советских домов-коммун конца 1920-х гг., "конденсаторов общественной жизни" (с ними Ле Корбюзье познакомился, регулярно посещая Москву во время строительства Дома Центросоюза)...» [6].

17-й этаж покрыт *плоской* железобетонной *крышей*, предназначенной для прогулок и активного физического отдыха жильцов здания. Крыша представляет собой уникальную скульптурную композицию. Она включает открытую эстраду (сцену) для уличных концертов, расположенную около северной торцевой стены. В надстройке, похожей на рубку круизного лайнера, вначале размещались детский сад (ясли) на 150 мест и спортивный (тренажерный) зал (рис. 16).

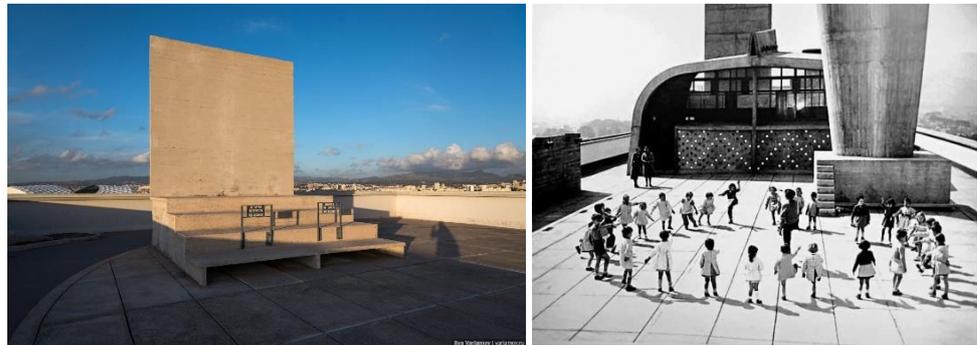


Рис. 16. Открытая эстрада для уличных концертов (слева)<sup>18</sup>; арт-центр современного искусства MaMo (справа)<sup>19</sup>

Fig. 16. Left: bandstand, right: Art Center for MaMo contemporary art

«Крыша, где проходил ряд театральных представлений, была отремонтирована в 2010 и 2022 гг., а с 2013 г. на ней разместился выставочный центр под названием MaMo, возглавляемый французским дизайнером Оро Ито. С крыши открываются восхитительные панорамы Средиземного моря и жилой застройки Марселя (рис. 17).

Здесь же предусмотрен неглубокий прямоугольный бассейн, в котором можно освежиться в жаркий день (рис. 18).

Не менее интересно решен периметр крыши, с которой во все стороны видны великолепные ландшафты, открытые солнцу и морю. Для того чтобы уменьшить страх зрителей перед высотой, Шарль-Эдуард придумал оригинальную систему ограждения смотровых площадок: «Если ты стоишь на крыше "жи-

<sup>18</sup> URL: <https://varlamov.ru/2751912.html?ysclid=lxzufd66id828021379>

<sup>19</sup> URL: [https://probauhaus.ru/wp-content/uploads/2015/03/Slet-for-Le-Corbusier-705329\\_0.jpg](https://probauhaus.ru/wp-content/uploads/2015/03/Slet-for-Le-Corbusier-705329_0.jpg)

лой единицы", то может создаться впечатление, что ты стоишь над пропастью... Но если совсем подойти к краю, то под самым краем можно обнаружить специальную беговую дорожку, которая опоясывает весь дом. Эта дорожка-лестница изолируется стеной, которая превышает человеческий рост...» [9] (рис. 19, 20).



Рис. 17. Дизайнер Оро Ито на крыше Марсельской «жилой единицы»<sup>20</sup>  
Fig. 17. Designer Oro Ito on the roof of Unite d'Habitation

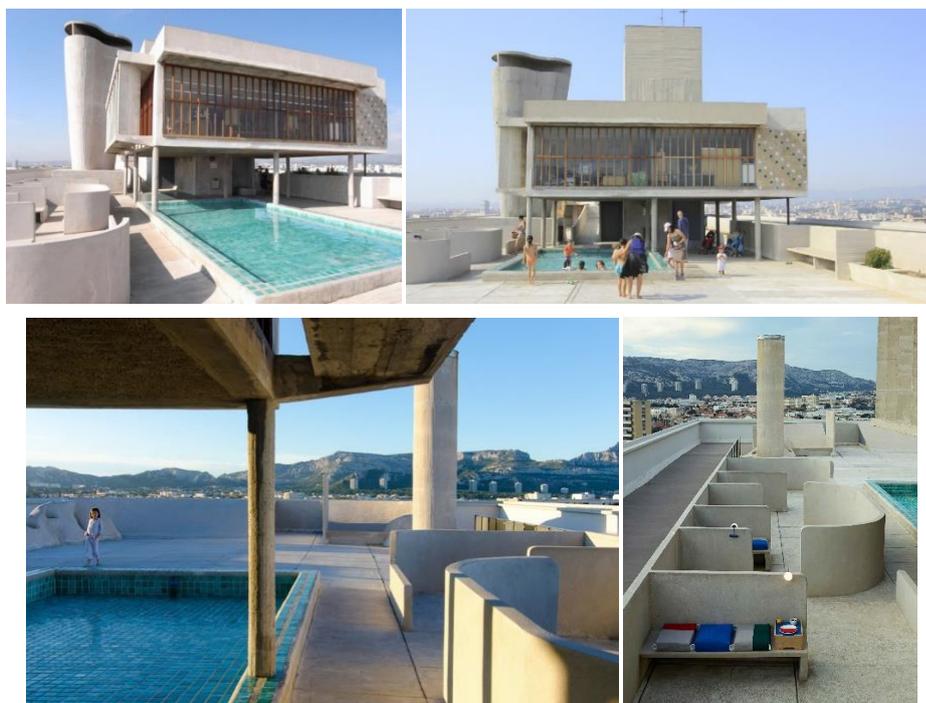


Рис. 18. Открытый бассейн на крыше Марсельской «жилой единицы»<sup>21</sup>  
Fig. 18. Outdoor rooftop pool in Unité d'Habitation

<sup>20</sup> URL: [https://static.purple.fr/2015/06/121218\\_P19\\_00-043.jpg](https://static.purple.fr/2015/06/121218_P19_00-043.jpg)

<sup>21</sup> URL: <https://probauhaus.ru/wp-content/uploads/2015/03/Gorod-vnutri.-ZHilaya-edinitsa-ot-Korbyuz-e-2.jpg>; <https://softculture.cc/images/gallery/849/ostr-3.jpg>; [http://corbusier.totalarch.com/unite\\_d\\_habitation\\_marseille](http://corbusier.totalarch.com/unite_d_habitation_marseille)



Рис. 19. Оборудование плоской крыши Марсельской «жилой единицы». Видовые точки<sup>22</sup>  
 Fig. 19. On a flat roof of Unité d'habitation

«Ле Корбюзье настоял на том, чтоб здесь поставили также, казалось бы, не нужную никому белую стену; она служила для того, чтобы детям было на чем рисовать цветными мелками. Другая половина крыши предоставлялась взрослым, для которых здесь были устроены баскетбольная площадка, место для прыжков в длину и высоту, беговая дорожка (рис. 20, 21) и установлены различные спортивные снаряды...» [8].



Рис. 20. Ограждение периметра крыши и лоджий Марсельской «жилой единицы»<sup>23</sup>  
 Fig. 20. Roof and loggia perimeter fencing in Unité d'habitation



Рис. 21. Беговая дорожка по периметру крыши Марсельской «жилой единицы»<sup>24</sup>  
 Fig. 21. Roof perimeter treadmill

<sup>22</sup> URL: [https://api.interior.ru/images/ART/Sobytie/IciparJeanPierreRaynaud/DJI\\_0037.jpg](https://api.interior.ru/images/ART/Sobytie/IciparJeanPierreRaynaud/DJI_0037.jpg)

<sup>23</sup> URL: <https://i1.wp.com/corbusier.totalarch.com/files/build/043/031.jpg>

<sup>24</sup> URL: <https://i0.wp.com/corbusier.totalarch.com/files/build/043/036.jpg> ([https://skillbox.ru/upload/setka\\_images/10375911012024\\_ea2b2f998665356b094cbc9e4d99ecdc646b93d5.jpg](https://skillbox.ru/upload/setka_images/10375911012024_ea2b2f998665356b094cbc9e4d99ecdc646b93d5.jpg))

Завершая данное исследование, необходимо отметить, что после окончания Второй мировой войны Шарль-Эдуард активно занялся восстановлением разрушенных городов и разработкой уникальных версий жилых блоков и комплексов для людей, оставшихся без крова. Особое внимание он уделил социальным аспектам, корректировке образа жизни своих современников и их духовному единению. С этой целью он создал проект монументального жилого здания в 17 этажей, рассчитанного на принципиально новые формы проживания. Многоэтажное здание включает четыре функциональные зоны, занимающие его различные высотные уровни (реализация пяти «принципов современной архитектуры» Ле Корбюзье).

1. В целях экономии площади застройки зодчий приподнял здание на один этаж, устроив под ним стоянку для автомобилей. Созданная им опорная структура позволила наполнить окружающие ее дворовые территории растительностью (клумбы, газоны, кустарники, хвойные и лиственные деревья). Этим самым обеспечивалась чистота воздуха.

2. Жилая часть многоэтажного дома включала пять низких коридоров («внутренних улиц») и два блока жилых «ячеек», расположенных на 1–6 и 9–17 этажах. Одно- и двухуровневые квартиры были рассчитаны на разное количество жильцов. Размеры жилых ячеек были примерно равны, что в какой-то мере уравнивало социальный статус людей, духовно сближало их.

3. «Торговая улица», занимающая 7-й и 8-й этажи, включала магазины, два ресторана, отделения бытового обслуживания, кинотеатр и прочие заведения, позволявшие обитателям ячейки «пользоваться всеми благами современного города, не выходя во внешний мир». Подняться на этот уровень с улицы можно было по винтовой лестнице, устроенной на глухом северном торце здания. Социализация жильцов должна была способствовать формированию единого коллектива (коммуны) – опыт советских архитекторов-авангардистов.

4. Плоская крыша-сад, предназначенная для активного отдыха жильцов и занятий спортом, включала тренажерный зал, беговую дорожку по периметру с двойным ограждением, детский сад-ясли на 150 мест, открытый бассейн и сцену для театральных представлений. Не менее интересно был решен периметр крыши, с которой во все стороны видны великолепные ландшафты, открытые солнцу и морю.

Для практической реализации всех архитектурных новаций требовалось решить немало технических проблем. Особенностям конструктивного решения Марсельской «жилой единицы», ее «мондриановским» фасадам и интерьерам будет посвящена наша следующая статья.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. 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.
3. Поляков Е.Н., Полякова О.П. Становление «минималистического» направления в творчестве Ле Корбюзье. Вилла Штейна / де Монзи в Гарше // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 9–24.

4. *Ле Корбюзье*. Архитектура XX века : пер. с франц. 2-е изд. Москва : Прогресс, 1977. 303 с.
5. *Чумакова К.* В гостях у Ле Корбюзье: Адреса его квартир, которые сдаются // Houzz. URL: <https://www.houzz.ru/statyi/v-gostyah-u-le-korbyuzye-adresa-ego-kvartir-kotorye-sdayutsya-stsetivw-vs~87433829?ysclid=lxysqktb64852689296>
6. *Жилая единица (Unité d'Habitation)*, Марсель, Франция. 1945–1952 // Totalarch. URL: [http://corbusier.totalarch.com/unite\\_d\\_habitation\\_marseille](http://corbusier.totalarch.com/unite_d_habitation_marseille) (дата обращения: 20.09.2024).
7. *Пернатъев Ю., Васильева Е.* Жилая единица Ле Корбюзье в Марселе // 100 знаменитых памятников архитектуры. Москва : Литрес, 2013. 670 с. URL: [https://www.litres.ru/book/elena-vasileva-2/100-znamenityh-pamyatnikov-arhitektury-4888699/?contentType=book&slug=100-znamenityh-pamyatnikov-arhitektury-4888699&lfrom\\_processed=619692077lxur6w6xur327560896](https://www.litres.ru/book/elena-vasileva-2/100-znamenityh-pamyatnikov-arhitektury-4888699/?contentType=book&slug=100-znamenityh-pamyatnikov-arhitektury-4888699&lfrom_processed=619692077lxur6w6xur327560896)
8. *Станькова Я., Пехар И.* Тысячелетнее развитие архитектуры : пер. с чеш. Москва : Стройиздат, 1987. 296 с.
9. *Город внутри*. Жилая единица от Корбюзье // project Bauhaus. URL: <https://probauhaus.ru/unite-d-habitation/?Ysclid=lxz8402il874370580> (дата обращения: 29.09.2024).
10. *Le Corbusier's Unité d'Habitation de Marseille: Redefining Urban Living* // ArchEyes. URL: <https://archeyes.com/unite-d-habitation-de-marseille-le-corbusiers-visionary-masterpiece/> (дата обращения: 29.09.2024).

#### REFERENCES

1. *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)
2. *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. (In Russian)
3. *Polyakov E.N., Polyakova O.P.* Minimalism Formation in Works of Le Corbusier. Villa Stein-de Monzie IN Garches (1925–1928). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (3): 9–24. (In Russian)
4. *Le Corbusier*. Architecture of the 20th century. 2nd ed. Moscow: Progress, 1977. 303 p. (Russian translation)
5. Visiting Le Corbusier: Addresses of his apartments for rent. Available: [www.houzz.ru/statyi/v-gostyah-u-le-korbyuzye-adresa-ego-kvartir-kotorye-sdayutsya-stsetivw-vs~87433829?ysclid=lxysqktb64852689296](http://www.houzz.ru/statyi/v-gostyah-u-le-korbyuzye-adresa-ego-kvartir-kotorye-sdayutsya-stsetivw-vs~87433829?ysclid=lxysqktb64852689296) (In Russian)
6. Housing unit (Unité d'Habitation), Marseille, France. 1945-1952. Available: [http://corbusier.totalarch.com/unite\\_d\\_habitation\\_marseille](http://corbusier.totalarch.com/unite_d_habitation_marseille) (accessed September 20, 2024).
7. *Permatiev Y., Vasilieva E.* Le Corbusier's Residential Unit in Marseille. In: 100 Famous Monuments of Architecture. Moscow: Litres, 2013. 670 p Available: [www.litres.ru/book/elena-vasileva-2/100-znamenityh-pamyatnikov-arhitektury-4888699/?contentType=book&slug=100-znamenityh-pamyatnikov-arhitektury-4888699&lfrom\\_processed=619692077lxur6w6xur327560896](https://www.litres.ru/book/elena-vasileva-2/100-znamenityh-pamyatnikov-arhitektury-4888699/?contentType=book&slug=100-znamenityh-pamyatnikov-arhitektury-4888699&lfrom_processed=619692077lxur6w6xur327560896) (In Russian)
8. *Stankova J., Pehar I.* Thousand-Year Development of Architecture. Moscow: Stroyizdat, 1987. 296 p. (Russian translation)
9. The City Inside. Residential Unit by Corbusier. Available: <https://probauhaus.ru/unite-d-habitation/?Ysclid=lxz8402il874370580> (accessed September 29, 2024). (In Russian)
10. Le Corbusier's Unité d'Habitation de Marseille: Redefining Urban Living. Available: [https://archeyes.com/unite-d-habitation-de-marseille-le-corbusiers-visionary-masterpiece](https://archeyes.com/unite-d-habitation-de-marseille-le-corbusiers-visionary-masterpiece/) (accessed September 29, 2024)

#### 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, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [orppr2010@yandex.ru](mailto:orppr2010@yandex.ru)

*Воевода Юлия Евгеньевна*, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, wailonger@yandex.ru

**Authors Details**

*Evgeny 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, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, oppopp2010@yandex.ru

*Yulia E. Voevoda*, Undergraduate Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, wailonger@yandex.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 23.09.2024  
Одобрена после рецензирования 10.10.2024  
Принята к публикации 31.10.2024

Submitted for publication 23.09.2024  
Approved after review 10.10.2024  
Accepted for publication 31.10.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 6. С. 44–57.

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 (6): 44–57.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 726.03

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-44-57

EDN: DIWJDM

## НАЦИОНАЛЬНОЕ НАСЛЕДИЕ ЯКУТСКА И ЕГО ПРЕЕМСТВЕННОСТЬ В СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЕ ГОРОДА

**Дарья Руслановна Панкратова, Олеся Олеговна Смолина**

*Новосибирский государственный  
архитектурно-строительный университет (Сибстрин),  
г. Новосибирск, Россия*

**Аннотация.** Настоящее исследование посвящено изучению влияния национального наследия Якутска на процессы архитектурного развития города и сохранение традиций в современных архитектурных решениях. Рассмотрены следующие объекты: Могол ураса, зимняя бревенчатая юрта (балаган), коновязные столбы сэргэ и традиционные якутские орнаменты. Приведены примеры построек Якутска, в которых прослеживается влияние и внедрение национальных символов и форм в их архитектурный облик.

**Актуальность.** В исследовании отмечается важность поддержания преемственности и сохранения традиций архитектуры Якутска, подчеркивается их существенная роль в формировании современного облика города. Материальные объекты, созданные в соответствии с традиционными строительными особенностями, придают зданиям особую атмосферу и уникальность, ретроспективно отражая дух и культурное наследие якутского народа в современной городской среде. Сохранение архитектурных традиций имеет большое значение для защиты и передачи уникальных культурных ценностей.

**Новизна исследования.** Систематизация и концептуализация методов формообразования, характерных для национальных строений и символов, с последующим исследованием их интеграции в архитектуру Якутска.

**Цель работы** – выявить особенности и преемственность в формообразовании современной архитектуры г. Якутска.

**Методика** заключается в интеграции исторических форм и якутской культуры в современную архитектуру. Она нацелена на изучение особенностей якутских национальных жилищ, анализ религиозных символов, их сакрального значения и применимости в архитектурном ландшафте.

**Результаты** исследования. В анализе национальных объектов выявлены традиционные строительные особенности и элементы, которые оказывают влияние на современные архитектурные решения. Установлено, что современная архитектура Якутска продолжает использовать традиционные материалы, символы, формы и цветовые решения якутской культуры, интегрируя при этом инновации и современную функциональность.

**Ключевые слова:** Якутск, Могол ураса, балаган, коновязные столбы сэргэ, якутские орнаменты

**Для цитирования:** Панкратова Д.Р., Смолина О.О. Национальное наследие Якутска и его преемственность в современной архитектуре города // Вестник

Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024.  
Т. 26. № 6. С. 44–57. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-44-57. EDN: DIWJDM

## ORIGINAL ARTICLE

**NATIONAL HERITAGE OF YAKUTSK AND ITS  
TRADITIONS IN MODERN URBAN ARCHITECTURE****Darya R. Pankratova, Olesya O. Smolina***Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,  
Novosibirsk, Russia*

**Abstract.** This work studies the influence of the national heritage of Yakutsk on its architectural development and preservation of traditions in modern architecture. Considered are mogol urasa, winter log yurt (balagan), contiguous serge poles and traditional Yakut ornaments. The analysis of national sites identify traditional buildings and elements affecting modern architectural solutions. Buildings in Yakutsk are described, in which the influence and implementation of national symbols and forms in their architectural appearance is observed. It is shown that the modern architecture of Yakutsk continues to use traditional materials, symbols, shapes and colors of the Yakut culture, while integrating innovative and modern functionality. It is important to continue and preserve traditions of Yakutsk architecture, emphasizing their essential role in the formation of the modern architecture of the city. Material objects created in accordance with traditions give the houses a special atmosphere and uniqueness, retrospectively reflecting the spirit and cultural heritage of the Yakut people in the modern urban environment. The importance of preserving these architectural traditions lies in the preservation and transmission of unique cultural values.

*Purpose:* The aim of the work is to identify continuity in the modern architecture of Yakutsk.

*Methodology:* Interpretation of historical forms and Yakut culture in modern architecture. It focuses on Yakut national houses, the analysis of religious symbols, their sacred significance and applicability in the architectural landscape.

*Value:* Systematization and conceptualization of formative methods typical for national buildings and symbols, while studying their integration in architecture of Yakutsk.

**Keywords:** Yakutsk, mogol urasa, balagan, serge, Yakut ornaments

**For citation:** Pankratova D.R., Smolina O.O. National Heritage of Yakutsk and its Traditions in Modern Urban Architecture. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (6): 44–57. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-44-57. EDN: DIWJDM

В последние годы г. Якутск активно развивается. В разных его районах возникают новые архитектурные объекты, комплексы и достопримечательности. Для создания характерной городской идентичности местные архитекторы обращаются к богатой истории и традициям народа саха. Якуты всегда строили свои жилища на земле, используя древесину, кору, кожу и ткань. Каркасы этих построек обмазывали глиной, землей и навозом. В отличие от других народов, живших в землянках, подземельях и пещерах, для якутов было характерно строительство именно наземных жилищ.

Якутский народ традиционно уделял большое внимание выбору комфортного и безопасного места для строительства жилищ. Для якутов это место символизировало их родную землю «алаас», которую они считали центром

Вселенной, а также местом обитания героев своих эпических преданий. Смертный человек, согласно традиционным представлениям якутов, воспринимал пространство вокруг себя с учетом разнообразных факторов. Место считалось удачным или неудачным с точки зрения энергетики и психологического комфорта. Изначально якутские жилища размещались на окраине открытых долин, близ мест, где велась хозяйственная деятельность, а также рядом с водоемами. Таким образом, на удаленных территориях можно было встретить жилища охотников, а вблизи пастбищ – постройки скотоводов. Якуты верили в особую связь между местом обитания рогатого скота и его плодородием, поэтому предпочитали строить свои дома поблизости от таких мест. С течением времени территории таких жилищных поселений постепенно осваивались и обустроивались разнообразными постройками, в которых осуществлялась хозяйственная деятельность.

Эклектика национальной идентичности в архитектурном дизайне современных городов проявляется в интеграции древних элементов в архитектурные концепции настоящего времени. Этот процесс способствует сохранению культурного наследия и исторической памяти для будущих поколений. Традиционные детали декора и архитектурные формы старинных жилищ якутов воплощаются в современных проектах городов, отдельных зданий и сооружений, тем самым проявляется уважение к историческим корням и национальной традиции в контексте развития современной городской среды.

Могол ураса, изображенная на рис. 1, является проявлением преемственности в архитектуре традиционных жилищ якутов, адаптированных к климатическим условиям региона. Тип жилой постройки зависит от времени года и континентального климата Якутска. Типичный облик Могол урасы представляет собой стационарное строение конической формы, покрытое слоем бересты. В этом жилище якуты пребывали в летний период. Круглое основание сооружения символизирует вселенскую универсальность. Оно окружено 12 столбами сэргэ, символизирующими двенадцать небесных сфер, основание в виде окружности воссоздает организацию Вселенной, космического и социального уклада [1]. Деревянные прутья соединены в круг, на который уложены три стержня, образующих коническую раму. Эти элементы укрепляются вверху и закрепляются, после чего дом завершается сооружением крыши. В целом Могол ураса является важным структурным элементом традиционной архитектуры якутов, отражающим их уникальный подход к строительству жилищ и умение сочетать функциональность со стилистическим изяществом.

Характерной чертой Могол урасы является разделение ее конической структуры на три сегмента, что приводит к ассоциациям с архаичным культурным контекстом народа саха и эпическим произведением «Олонхо», отражающим три части мирового устройства: нижнюю, среднюю и верхнюю. Присутствие отверстия на вершине урасы, выполняющего функцию дымохода, светового источника и символического «портала» к небесным божествам, представляет собой образное олицетворение взаимосвязи с окружающим миром и духовными силами [2].

Могол ураса характеризовалась значительными габаритами, что символизировало высокий социальный статус и материальное благополучие владель-

цев. Высота этих архитектурных сооружений достигала 11–12 м, при этом диаметр основания не превышал 10 м. Могол ураса также могла служить в качестве храма, в котором проводился священный обряд Айах тутуу.

Строение деревянного балагана (рис. 2) создавалось путем сборки вертикально расположенных бревен и основывалось на четырех столбах. Внешне это сооружение напоминает усеченную пирамиду (*др.-египт.* мастабу). Его стены наклонены внутрь под углом около  $70^\circ$ . Они покрывались снаружи смесью навоза и глины. Летом для обеспечения циркуляции воздуха внутри балагана в стенах делались прорезы, которые использовались в качестве окон и закрывались воловьими или рыбьими пузырями, волосяными сетками или слюдой. В зимний период окна закрывались плитами изо льда [3]. Конструктивные особенности формы балагана и его элементов обеспечивали низкие теплопотери в зимний сезон. Наклонная стена выполняла функцию ветрового экрана, предотвращающего проникновение холодных северных ветров в жилище [4].

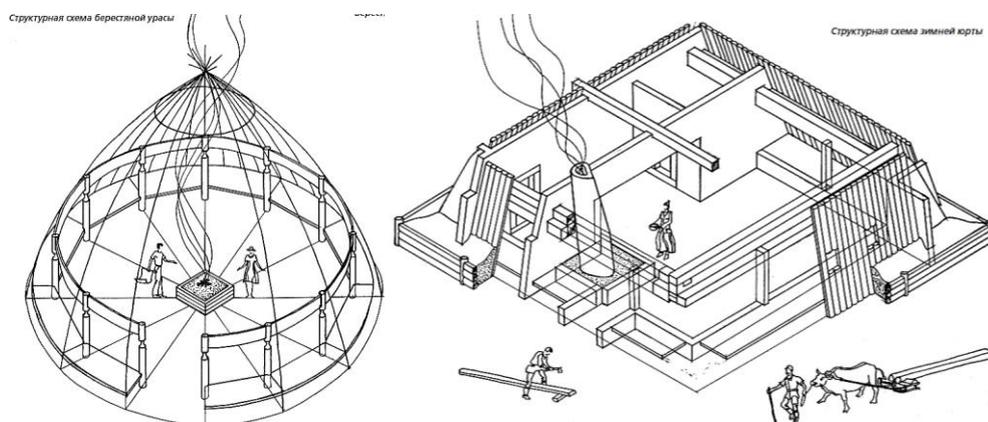


Рис. 1. Конструкция Могол урасы<sup>1</sup>  
Fig. 1. Construction of mogol urasa

Рис. 2. Конструкция балагана<sup>2</sup>  
Fig. 2. Construction of balagan

Для сохранения тепла было принято устраивать снаружи насыпь из земли (кунус). В северных районах земляная насыпь покрывала весь деревянный остов балагана, а в южных – лишь его часть. Для предотвращения осыпания земляную насыпь иногда окружали деревянным забором. Полom внутри балагана служила сама земля. Очаг, называемый «камелек», размещался в центре или в углу жилища. Обмазанный глиной камин цилиндрической формы, чуть скошенный по внутренней грани, постепенно переходил в дымоход (уэлес). Поленья ставились вертикально непосредственно на очаг, а широкое верхнее отверстие камина обеспечивало быстрый нагрев помещения. Однако по мере угасания огня тепло быстро уходило [5].

Сэргэ – это ритуальные столбы, широко распространенные не только в якутской бытовой культуре, но и в фольклорных традициях иных сибирских

<sup>1</sup> Лыткин К.А. Органическая среда обитания на Крайнем Севере // Жилищное строительство. 2013. № 10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organicheskaya-sreda-obitaniya-na-kraynem-severe>

<sup>2</sup> Там же.

народов (бурят, тувинцев, хакасов и алтайцев). Эти скульптурные изделия занимают важное место в духовных верованиях народов, выполняя роль космических центров [6]. Противоположно жилому зданию были размещены функциональные конюшни, предназначенные для стоянки лошадей всадников. Священные конюшни, или комплексы, находились в отдалении от основных жилых зданий. Для размещения данных священных элементов использовались открытые долины, известные как алаасы. Обычно это была ровная местность с небольшими холмами и источниками воды. В этих алаасах якуты ежегодно праздновали Ысыах – день летнего солнцестояния (20–21 июня). По мнению старейшин, священные конюшни способствовали установлению связи с небесным царством, заселенным божествами, и поэтому они были тщательно украшены орнаментальными мотивами, символизирующими божественные благословения [7].

Религиозная символика всегда играла очень важную роль в истории искусства и культурной эволюции, изменяясь вместе с обществом. Глубокая многоплановая структура символов воздействует на психологию зрителя, вызывая у него особый уровень понимания. Цель символов заключается в установлении связи между конкретными проявлениями и основными принципами бытия, предлагая всестороннюю и перспективную интерпретацию [8].

Орнаментация важна для искусства и культуры, она отражает творческую энергию как отдельных личностей, так и целых сообществ. Уникальный дизайн орнаментов выражает особенности и культурные традиции определенной этнической группы. Изменения, произошедшие в жизни якутов, привели к утрате некоторых элементов орнаментации, что повлияло на ее облик [9].

Искусство якутского народа представляет собой значительное культурное явление среди этнических групп Сибири, известное своим уникальным декоративным стилем и оригинальностью. Исторические события служат основой для создания традиционных узоров и орнаментов якутского народного творчества. Многочисленные находки археологических раскопок подтверждают, что некоторые орнаментальные элементы были известны еще в глубокой древности. С течением времени развивающаяся якутская этническая группа модифицировала свой орнаментальный стиль, делая его более сложным и обогащая новыми мотивами. В то же время якутский орнамент сохраняет уникальные элементы, символы и композиции, отражающие традиционные культурные особенности и сочетающиеся с когнитивными структурами коренных народов [10].

На рис. 3 представлены примеры инфраструктуры города, базирующиеся на сакральном значении и традиционной форме Могол урасы. При возведении современных памятников и иных архитектурных сооружений прослеживаются элементы формообразования Могол урасы. При создании городских сооружений или малых архитектурных форм, как правило, применяют только образ Могол урасы, а ее каноничным размером и пропорциями пренебрегают. А в проектировании жилых и общественных зданий стараются передать не только архитектурный образ, но и сохранить пропорции: отношение радиуса от центра основания к центральной вертикальной оси. Это отношение должно быть равным (или с небольшой погрешностью) золотому сечению. Кроме того, независимо от назначения здания или сооружения, при проектировании учитывается поперечное деление Могол урасы на три части, обозначающее деление на три мира, согласно эпосу «Олонхо».



Рис. 3. Примеры применения символики Могол урасы в современном строительстве<sup>3</sup>:  
 а – Губинский мост, Якутск; б – спортивный комплекс «Триумф», Якутск; в – памятник Абакаяде и Семёну Дежневу, Якутск; г – Могол ураса, местность «Ус Хатын»; д – ТЦ «Ураса Молл», Якутск; е – Государственная филармония и Арктический центр эпоса и искусств, Якутск

Fig. 3. Application of mogol urasa in modern construction:  
 a – Gubinsky Bridge; b – Triumph Sport Complex; c – Monument to Abakayad and Semyon Dezhnev; d – Us Khatyn area; e – Urasa Mall; f – State Philharmonic and Arctic Center for Epic and Arts

Из рассмотренных примеров интеграции Могол урасы в современную архитектуру можно выделить несколько способов формообразования (рис. 4).

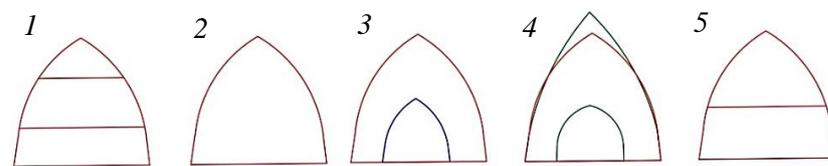


Рис. 4. Примеры формообразования Могол урасы в современном строительстве. Автор Д.Р. Панкратова:

1 – традиционная форма Могол урасы: учитываются канонические размеры, форма и деление на 3 части; 2 – объект сохраняет только форму, деление на части не учитывается; 3 – формообразование объекта происходит за счет изменения масштаба традиционной формы; 4 – формообразование объекта осуществляется изменением традиционных размеров, пропорций. Сохраняется только образ Могол урасы; 5 – традиционное деление на 3 части не учитывается, возможно самопроизвольное деление формы на усмотрение архитектора

Fig. 4. Formation of mogol urasa in modern architecture:  
 1 – traditional form (canonical size, shape and division into 3 parts); 2 – object shape; 3 – change in the traditional form; 4 – change in traditional dimensions, proportions, mogol urasa only is preserved; 5 – spontaneous division of the form

<sup>3</sup> URL: [https://photos.wikimapia.org/p/00/00/20/18/98\\_big.jpg](https://photos.wikimapia.org/p/00/00/20/18/98_big.jpg); URL: [https://csp-sakha.ru/images/econarticle-images/1/intro/42\\_d7k\\_8779-850x602-1.jpg](https://csp-sakha.ru/images/econarticle-images/1/intro/42_d7k_8779-850x602-1.jpg); URL: [https://virtualyakutia.ru/sites/default/files/styles/full-view/public/bg-banner/img\\_1005.jpg?itok=nN4P6NIg](https://virtualyakutia.ru/sites/default/files/styles/full-view/public/bg-banner/img_1005.jpg?itok=nN4P6NIg); URL: <https://yakutia-daily.ru/wp-content/uploads/2022/06/foto-us-hatyn.jpg>; URL: <https://arenda-trk.ru/wp-content/uploads/2020/11/urassmall-yakutsk.jpg>; URL: [https://ysia.ru/wp-content/uploads/2023/07/Foto\\_3.jpg](https://ysia.ru/wp-content/uploads/2023/07/Foto_3.jpg)

Другой важной особенностью формообразования конструкций Могол урасы является современный подход к использованию материалов и технологий. Современные материалы (стекло, металл, бетон и пр.) сочетаются с традиционными, создавая уникальный симбиоз древних традиций и инноваций.

В современной якутской архитектуре образ и форма балагана (рис. 5) используются реже, обычно появляясь в архитектурно-этнографических комплексах. На этапе проектирования сохранен традиционный наклон стен, а также основной строительный материал – дерево. В своих современных вариантах балаган теперь нередко имеет второй этаж. Размеры могут варьироваться, в зависимости от назначения здания или сооружения, а вот пропорции остаются неизменными. Балаган сохраняет форму усеченной четырехгранной пирамиды.



Рис. 5. Примеры применения балагана в современном строительстве, Якутск<sup>4</sup>:

*a* – двухэтажный балаган; *б* – старая беседка в лесу. Фото Д.Р. Панкратовой; *в* – жилой частный дом в форме балагана; *г* – Литературный музей им. П.А. Ойунского; *д* – балаган в «старом городе»; *е* – балаган на территории краеведческого музея

Fig. 5. Balagan applications in modern architecture of Yakutsk:

*a* – two-story balagan; *b* – old gazebo in the forest. Photo D.R. Pankratova; *c* – living private house in the form of a balagan; *d* – Oyunsky Literary Museum; *e* – Balagan in the “old town”; *f* – Balagan on the territory of the Local Lore Museum

Конструкция балагана является неотъемлемым элементом архитектуры якутов. Его формообразование может варьироваться в зависимости от конкретных условий и требований проекта. Несколько примеров формообразования конструкции балагана представлено на рис. 6.

В древние времена сэргэ могли выполнять функцию несущих вертикальных конструкций-колонн, одним из примеров которых является сооружение Могол ураса. В современной архитектуре колонны зданий часто повторяют форму этих священных связанных столбов (рис. 7). В идеале расчет пропорций

<sup>4</sup> URL: <https://yakutmuseum.ru/hr/zabytyj-ocherk-m-m-nosova-starinnye-yakutskie-postrojki-holomoi-balagan>; URL: [https://100yakutia.ru/images/News/Tomtor\\_EK\\_1609\\_1.jpeg](https://100yakutia.ru/images/News/Tomtor_EK_1609_1.jpeg); URL: <https://2gis.ru/yakutsk/gallery/firm/7037402698748499/photoId/7036874449577875?m=129.721296%2C62.026201%2F17.74%2Fp%2F8.82%2Fr%2F44.04>; URL: <https://2gis.ru/yakutsk/gallery/geo/7037510072937968/photoId/30258560079075905?m=129.737459%2C62.024986%2F17.75>; URL: <https://2gis.ru/yakutsk/gallery/firm/70000001066657367/photoId/30258560054421540?m=129.747524%2C62.030548%2F18.22>

хозяйственных сэргэ подразумевает соотношение одной части диаметра к шести частям высоты, что подтверждается изучением результатов измерений.

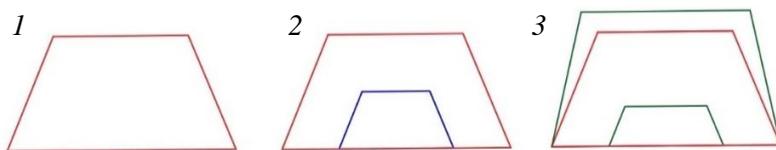


Рис. 6. Примеры формообразования балагана в современном строительстве. Автор Д.Р. Панкратова:

1 – традиционная форма балагана, сохранены размеры, угол наклона стен, пропорции; 2 – формообразование объекта происходит за счет изменения масштаба традиционной формы; 3 – формообразование объекта происходит за счет изменения размеров, угла наклона стен. Сохраняется только образ балагана

Fig. 6. Examples of formation of Balagan in modern architecture. Author D.R. Pankratova: 1 – traditional balagan shape (dimensions, wall angle of inclination, proportions); 2 – changing the traditional form; 3 – changes in dimensions, angle of inclination



Рис. 7. Примеры применения коновязи сэргэ в современном строительстве, Якутск<sup>5</sup>: а – мемориальный комплекс «Победа»; б – памятник «Бриллиантовое Сэргэ» олицетворяет главные символы Якутии – коновязь сэргэ и бриллианты; в – бассейн «Чолбон»; г – этнический комплекс «Усадьба Атласовых»; д – остатки древних сэргэ; е – рынок «Сайсары». Фото Д.Р. Панкратовой

Fig. 7. Application of serge in modern architecture of Yakutsk: а – memorial complex “Pobeda”; б – Diamond Serge Monument represents the main symbols of Yakutia; в – swimming pool “Cholbon”; г – ethnic complex “Atlasov Estate”; е – remains of ancient serge; ф – “Saisary” market. Photo D.R. Pankratova

<sup>5</sup> URL: <https://www.on-walking.com/files/yakutsk-8/004.jpg>; URL: <https://sakhalife.ru/wp-content/uploads/2024/08/5368838098324152386.jpg>; URL: <https://fondyakutia.ru/wp-content/uploads/2019/09/CHolbon.jpg>; URL: [https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSLt78ZA7YZfmjp2rVRTAahRuTq6QJetjXKKDUehZogOxE3\\_NN2](https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSLt78ZA7YZfmjp2rVRTAahRuTq6QJetjXKKDUehZogOxE3_NN2); URL: <https://old.bigenc.ru/media/2017/11/13/1239217450/36274.jpg>

В проектах сегодняшнего дня столбы сэргэ приобретают более современное звучание, в них применяются различные инновационные материалы (металл, стекло и пр.). Декоративные элементы приносят в образ столбов уникальность и индивидуальность, а геометрические и формальные аспекты стилистически интерпретируют традиционные якутские мотивы. Примеры формообразования конструкции столбов сэргэ представлены на рис. 8.

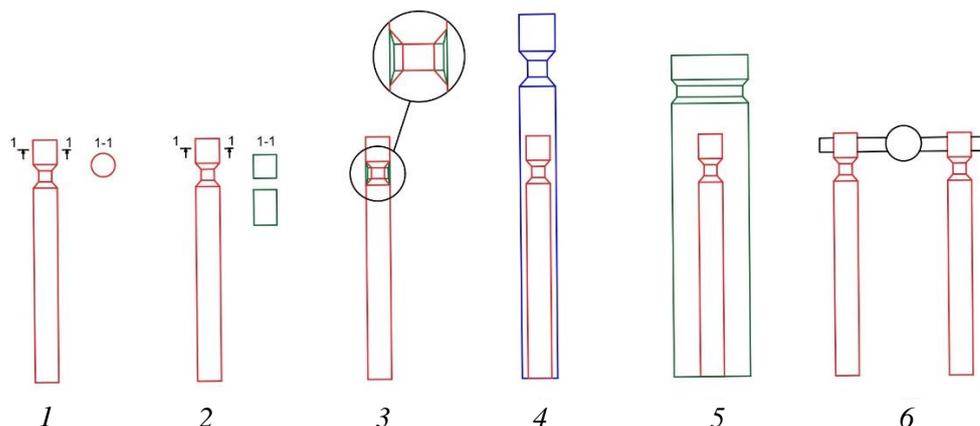


Рис. 8. Примеры формообразования коновязи сэргэ в современном строительстве. Автор Д.Р. Панкратова:

1 – традиционная форма коновязного столба сэргэ. Поперечный разрез столба имеет форму круга. Сохранены размеры, пропорции; 2 – поперечное сечение столба может иметь форму квадрата, прямоугольника; 3 – изменение традиционного углубления или полное его отсутствие; 4 – формообразование объекта происходит за счет изменения масштаба традиционной формы; 5 – формообразование объекта происходит за счет изменения размеров и пропорций. Сохраняется только образ сэргэ; 6 – сочетание двух или более столбов горизонтальной балкой создает образ «воздушных ворот»

Fig. 8. Serge wire forms in modern architecture. Author D.R. Pankratova:

1 – traditional circle shape of a horse-binding serge post. Dimensions, proportions are preserved; 2 – square, rectangular cross-sections; 3 – modification of the traditional recess or no recess at all; 4 – changing the traditional form; 5 – changes in size and proportions. Only the serge image is preserved; 6 – combination of two or more posts with a horizontal beam creates the image of an “air gate”

В архитектуре г. Якутска историческая преемственность выражается через использование традиционных орнаментов. В табл. 1 представлена авторская классификация существующих орнаментов, встречающихся на улицах города (рис. 9).

В результате анализа современных конструкций были исследованы частота и область применения орнаментов, что отражено в табл. 2. Отмечается, что для украшения жилых домов используется геометрический орнамент, для административных зданий – чаще растительный орнамент. Гораздо реже встречается зооморфный орнамент, что обусловлено его относительно недавним формированием.

Таблица 1

Классификация якутских орнаментов

Table 1

Classification of Yakut ornaments

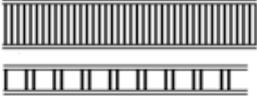
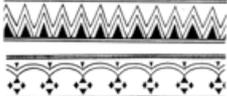
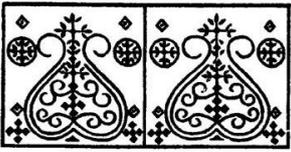
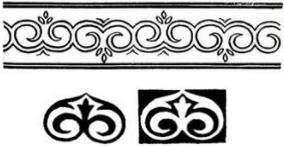
Геометрический орнамент			
Полосы	Круг	Зигзаг/Арки	Крест
			
Конструктивно-декоративные функции линии, ее графическая четкость и пластичность выразительность подчеркивают форму предмета, его фактуру	Орнамент круга связывает человека с окружающей средой, олицетворяет богатство и силу	Зигзаги или арочный мотив особенно характерны для украшения интерьера урасы (тип старого летнего жилища якутов)	Равноконечный крест является символом солнечного света, а также графическим изображением древнего степного бога солнца
Растительный орнамент			
Лировидный узор		Сердцевидный узор	
			
Центральным мотивом растительной группы орнаментов является процветшая лира, связанная с мотивом дерева жизни и кругом мифологических представлений якутов		Пышное цветение сердцевидного мотива в орнаментике всех народов является символом любви и согласия	
Зооморфный орнамент			
Мотив птиц	Мотив бараньих рогов	Мотив оленьих рогов	
			
Птица символизирует радость, свободу и устранение преград. Самыми популярными считаются рисунки орла, ворона и лебедя	Орнамент символизирует возрождение, движение и обновление. Подобный мотив встречается в интерьере различных сооружений и на украшениях из серебра	Олень – дух леса и защитник природы в якутской мифологии. Украшение с его изображением олицетворяет неразрывную связь человека и природы	



Рис. 9. Примеры применения орнаментов в современном строительстве, Якутск<sup>6</sup>:  
 а – краеведческий музей. Фото Д.Р. Панкратовой; б – жилой дом по ул. Ломоносова, 31/3; в – мост через Теплое озеро. Фото Д.Р. Панкратовой; г – фонтан на пл. Орджоникидзе; д – мемориальный комплекс «Победа»; е – торговый центр «Ураса Молл»

Fig. 9. Ornaments in modern construction in Yakutsk:  
 а – Museum of Regional Studies. Photo D.R. Pankratova; б – residential building, 31/3, Lomonosova Str.; в – bridge across the Toyploe Lake. Photo D.R. Pankratova; д – fountain on Ordzhonikidze Sq.; е – “Victory” Memorial; ф – shopping center “Urasa Mall”

Таблица 2

## Частота и область применения орнаментов

Table 2

## Frequency and scope of application of ornaments

Классификация орнаментов		Городские сооружения	Архитектура	Малые архитектурные формы
Геометрический	1. Полосы	+	+	+
	2. Круг	–	+	+
	3. Зигзаг	+	+	+
	4. Крест	–	+	+
Растительный	1. Лировидный	+	+	+
	2. Сердцевидный	+	+	+
Зооморфный	1. Мотив птиц	–	–	–
	2. Мотив бараньих рогов	–	+	+
	3. Мотив оленьих рогов	–	–	–
		■ – часто используемые	■ – редко используемые	■ – неиспользуемые

<sup>6</sup> URL: <https://2gis.ru/yakutsk/gallery/geo/7037510072943541/photoId/30258560071182623>; URL: <https://primamediamts.servicecdn.ru/f/big/1092/1091013.jpg?8fba109602c5abec6bce5993c28636c7>; URL: <https://autotravel.ru/phalbum/91751/183.jpg>; URL: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRJoSlA0poB84tnwb6syLncM1Y-6-OLqvOtfA&s>

Авторский анализ и интерпретация примеров интеграции Могол урасы, балагана, столбов сэргэ и якутских орнаментов позволяют сделать вывод о преобладании среди всех традиционных конструкций образа и формы Могол урасы (табл. 3).

Таблица 3

**Частота и область применения традиционных конструкций и орнаментов**

Table 3

**Frequency and scope of application of traditional structures and ornaments**

Примеры интеграции в архитектуру	Могол ураса	Балаган	Сэргэ	Орнаменты
Городские сооружения	+	–	+	+
Архитектура жилых/административных зданий	+	+	+	+
Малые архитектурные формы	+	+	+	+
<span style="background-color: #90EE90; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px; vertical-align: middle;"></span> – часто используемые <span style="background-color: #FFD700; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px; vertical-align: middle; margin-left: 10px;"></span> – редко используемые <span style="background-color: #FF0000; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px; vertical-align: middle; margin-left: 10px;"></span> – неиспользуемые				

Кроме того, отмечается широкое использование якутских орнаментов в качестве декоративных элементов.

**Выводы**

В процессе анализа результатов исследования становится очевидно, что современные якутские строения могут претерпевать изменения. В настоящее время наблюдается тенденция к применению более современных материалов и изменению размеров конструкций. Однако сохраняется ключевое значение образа и символического смысла традиционных якутских строений. Интеграция этих национальных элементов в современную архитектуру города способствует созданию уникальных черт местности, адаптации человека к среде и является фактором психологического комфорта. Привязка к культурному наследию и памяти предков дополнительно усиливает этот эффект.

Цель формирования якутской архитектуры состоит в трансляции идеи счастья, плодородия и жизненной энергии народа, отражая благополучие через символическую интерпретацию сооружений. При этом специфика данной архитектуры отражает космологическую структуру Вселенной, взгляды на космический порядок и мировую организацию. Возвращение к древним ценностям, вкладываемым в архитектурные формы, способствует формированию нового вектора развития современной якутской архитектуры.

На настоящем этапе развития города регулярно возводятся новые здания и сооружения, подчеркивающие уникальность национальной самобытности Якутска. Таким образом, традиции и преемственность национальных строений играют важную роль в формировании современного архитектурного ландшафта города, сохраняя уникальный характер местной культуры и одновременно отвечая современным требованиям функциональности и эстетики.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Данилова Н.К. Сакральное пространство: архитектурное воплощение традиционного мировоззрения народа саха // Вестник Томского государственного университета. История. 2016. Т. 39. № 1. С. 135–142. EDN: VLZAQV
2. Александрова А.Д., Греков Н.И. Традиции и преемственность в современной архитектуре Якутска // Творчество и современность. 2017. Т. 3. № 2. С. 5–12.
3. Петрова А.Г., Старостина А.А. Архитектурно-пространственная организация жилища и формообразование предметного мира саха // Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики. 2015. Т. 59. № 9. С. 133–138.
4. Вольская Л.Н., Дьяконова С.А. Экология жилища в культуре народа саха // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 6. С. 94–102. EDN: WMCDMN
5. Лыткин К.А. Традиционное якутское жилище // Архитектура и строительство России. 2007. № 1. С. 9–16.
6. Никифорова М.П. Ключевые факторы сохранения традиций в японской архитектуре, применимые в развитии современного якутского зодчества // Баландинские чтения. 2020. № 1. С. 55–62.
7. Слепцова А.А. История развития и классификация якутских сэргэ // Проблемы социально-экономического развития Сибири. 2020. Т. 42. № 4. С. 138–142. DOI: 10.18324/2224-1833-2020-4-138-142
8. Сивцева Р.П., Устинова В.П. Традиционный орнамент в культурном ландшафте современного г. Якутска // Молодой ученый. 2014. № 20.2 (79.2). С. 47–48.
9. Сидорова Л.Е., Федорова Д.Ф. Семантика орнаментальных мотивов народов саха // Наука и мир. 2020. Т. 88. № 12-2. С. 79–81. EDN: VQEVMB
10. Мубаракшина М.М., Федулова А.А. Орнамент как декоративный прием в архитектуре // Шаг в науку. 2018. № 2. С. 156–159. EDN: SDAHRW

## REFERENCES

1. Danilova N.K. Sacral Space: Architectural Embodiment of Traditional Outlook. *Istoriya. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016; 39 (1): 135–142. EDN: VLZAQV (In Russian)
2. Aleksandrova A.D., Grekov I. Traditions and Continuity in Modern Architecture of Yakutsk. *Tvorchestvo i sovremennost'*. 2017; 3 (2): 5–12. (In Russian)
3. Petrova A.G., Starostina A.A. Architectural and Spatial Organization of the House and Forming the Sakha Objective World. *Gramota*. 2015; 59 (9): 133–138. (In Russian)
4. Vol'skaya L.N., D'yakonova S.A. Housing Ecology in Culture of Sakha. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2016; (6): 94–102. EDN: WMCDMN (In Russian)
5. Lytkin K.A. Yakut Traditional House. *Arkhitektura i stroitel'stvo Rossii*. 2017; (1): 9–16. (In Russian)
6. Nikiforova M.P. Key Factors for Maintaining Traditions in Japanese Architecture. In: *Coll. Papers in memory of S.N. Balandin 'Balandin Readings'*. 2020; (1): 505–510. (In Russian)
7. Slepцова A.A. Development History and Classification of the Yakut Serge. *Problemy sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Sibiri*. 2020; 42 (4): 138–142. DOI: 10.18324/2224-1833-2020-4-138-142 (In Russian)
8. Sivtzeva R.P. Traditional Ornament in Cultural Landscape in Modern Yakutsk-City. *Molodoi uchenyi*. 2014; 79.2 (20.2): 47–48. (In Russian)
9. Sidorova L.E., Fedorova D.F. Semantics of Ornamental Motifs of Sakha people. *Nauka i mir*. 2020; 88 (12-2): 79–81. EDN: VQEVMB (In Russian)
10. Mubarakshina M.M., Fedulova A.A. Ornament as a Decorative Architecture Reception. *Shag v nauku*. 2018; (2): 156–159. EDN: SDAHRW (In Russian)

## Сведения об авторах

Панкратова Дарья Руслановна, магистрант, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, Ленинградская ул., 113, pankratova2016@inbox.ru

*Смолина Олеся Олеговна*, канд. архитектуры, доцент, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, Ленинградская ул., 113, Zelenoest-vo@mail.ru

#### **Authors Details**

*Darya R. Pankratova*, Undergraduate Student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, pankratova2016@inbox.ru

*Olesya O. Smolina*, PhD, A/Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, Zelenoest-vo@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 24.04.2024  
Одобрена после рецензирования 25.10.2024  
Принята к публикации 07.11.2024

Submitted for publication 24.04.2024  
Approved after review 25.10.2024  
Accepted for publication 07.11.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 6. С. 58–70.

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 (6): 58–70.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-58-70

EDN: XLICOS

## ПРЕДПОСЫЛКИ К ТЕОРЕТИЧЕСКИМ ОСНОВАМ АРХИТЕКТУРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ОТКРЫТЫХ ПРОСТРАНСТВ В КОНТЕКСТЕ ФОРМИРОВАНИЯ ФЕНОМЕНА «МЕСТА»

**Константин Евгеньевич Вавулин**

*Государственный университет по землеустройству, г. Москва, Россия*

**Аннотация.** *Актуальность.* Архитектурно-пространственные качества объектов образования и науки играют важную роль в процессе формирования интеллектуальной и социально целостной личности. Автор статьи рассматривает аспект открытого образовательного публичного пространства как среду, в которой происходит взаимодействие архитектуры и ее пользователей.

*Цель.* Проанализировать архитектурную среду (на примере научно-образовательных центров) как пространство взаимодействия пользователей и их физического окружения и сформировать научные предпосылки к теоретическим основам организации феномена «места».

*Материалы и методы.* Рассматривается анализ функционального зонирования и развития пространств, феноменологический анализ, географическая концептуализация пространств.

*Результаты, выводы.* В результате исследования выявлено, что физическая среда влияет на ощущение места, но также является результатом человеческого восприятия, чувств, эмоций и интерпретаций. Данное заключение предоставляет дальнейшее «поле» исследования для формирования научных основ к созданию феномена «места» посредством архитектуры.

**Ключевые слова:** архитектура открытых пространств, феноменология, феномен «места», географическая концептуализация пространств, «балет мест», образовательное пространство

**Для цитирования:** Вавулин К.Е. Предпосылки к теоретическим основам архитектурной организации открытых пространств в контексте формирования феномена «места» // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 58–70. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-58-70. EDN: XLICOS

## ORIGINAL ARTICLE

**THEORETICAL FOUNDATIONS  
OF OPEN AIR ARCHITECTURE  
FOR THE PHENOMENON OF PLACE****Konstantin E. Vavulin***State University of Land Use Planning, Moscow, Russia*

**Abstract.** The architecture and spatial qualities of educational and scientific objects play an important role in the formation of an intellectual and socially integral personality. The paper considers the educational public space as a place of interaction between the people and environment.

**Purpose:** The analysis of the architectural environment of scientific and educational centers as a space of interaction between the people and environment and scientific prerequisites for theoretical foundations of phenomenon of place.

**Methodology:** The analysis of functional zoning and development of spaces, phenomenological analysis, geographical conceptualization of spaces.

**Research findings:** The physical environment not only affects the place but also the human perception, feelings, emotions and interpretations. This provides further research into the formation of scientific foundations for the creation of the phenomenon of place through architecture.

**Keywords:** open air architecture, phenomenology, phenomenon of place, geographical conceptualization, "ballet of places", educational space

**For citation:** Vavulin K.E. Theoretical Foundations of Open Air Architecture for the Phenomenon of Place. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (6): 58–70. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-58-70. EDN: XLICOS

**Введение**

Пространство является неотъемлемой частью интеллектуальной ниши географии человека. С философской точки зрения можно отметить два противоположных направления. Для Платона пространство было предпосылкой размещения, место находится в пространстве. Аристотель, напротив, утверждал, что «нахождение где-либо» является отправной точкой существования, место является предпосылкой пространства. Онтологически данные направления остаются подвержены сомнению как дескрипторы опыта бытия-в-мире, это концепции, которые ставят вопрос о понимании архитектуры пространства. Несмотря на то, что данные концепции различны, архитектурное пространство и локализация важны с эпистемологической точки зрения.

В течение последнего десятилетия архитекторы, географы, социологи и психологи указывали на необходимость повышения осведомленности о пространстве в высшем образовании. Демонстрируется тесная взаимосвязь между пространственной и социальной дифференциацией в сфере высшего образования, поскольку архитектура образовательной среды влияет на академические и научные результаты. Под образовательной средой в данной статье автор предлагает использовать определение А.М. Новикова – «некая интеграция микросред, комплекс, аккумулирующий в себе целенаправленно создаваемые условия взаимодействия субъективного мира развивающейся личности и объективного мира, оказывающих прямое или опосредованное влияние на формирование личности» [1, с. 137].

Таким образом, открытое архитектурное пространство важно рассматривать в двух направлениях: как искусственная образовательная среда и как среда взаимодействия между архитектурой и пользователями. Пользователи образовательного пространства – это студенты, энергичные, любопытные, совершающие открытия, узнающие новое и несущие свои открытия в будущее, а также преподаватели, энергичные и экспериментирующие новаторы. Данный вопрос рассматривается в статье М.А. Соколова, автор заключает, что архитектура является не только и не столько стенами, сколько таким же учителем жизни, мудрости, человеческих ценностей, как и учебная программа университета [2].

В докторской диссертации А.В. Попов рассматривает концепцию архитектурного формирования кампусов в России, в том числе историческую систематизацию формирования кампусов [3]. С начала формирования образовательной архитектурной среды кампус рассматривался как абсолютное пространство, где архитектурное пространство понималось как естественное, данное и существенное, не имеющее присущих ему свойств. Согласно учению И. Ньютона, абсолютное пространство, по своей природе лишённое соотношения с чем-либо вне его, всегда остаётся подобным себе самому и неподвижным [4]. Наряду с материальными сооружениями не менее важной была самобытная архитектура, которая отличает архитектуру кампусов от окружающих городов. Уникальная архитектура считалась важной для формирования уникального академического и образовательного «места». Согласно Оксфордскому словарю географии, место – это определённая точка на земле, идентифицируемая для места, в котором сформировались и выросли человеческие ценности [5].

Амос Рапопорт обращает внимание на то, что архитектура является ключевым инструментом формирования психологической и физической принадлежности среди студентов посредством символической передачи «невербальных сообщений» [6]. Д.В. Пивоваров определяет пространство как атрибут расстояния, проявляющийся в отношениях между материальными или духовными телами [4].

Daniel R. Kenney (Дэниел Кенни) и другие исследователи считали, что «архитектура создает впечатление о характере учреждения и отражает его ценности и миссию. Идентичность учреждения отражена в его зданиях» [7, с. 48]. Аналогичным образом Edwards Brian (Брайан Эдвардс) утверждал, что университетские здания – это «молчаливые учителя», феномен, который называют «построенной педагогикой» кампуса [8].

Г.В. Есаулов пишет, что сегодня основной подход к приданию «неповторимости» архитектурного пространства сводится к художественно-дизайнерским акциям, таким как благоустройство, установки малых архитектурных форм и др. [9].

Однако предположение о том, что застроенная и благоустроенная среда создает ощущение места, является неполным, поскольку не учитывается, что люди являются неотъемлемой частью создания места. Необходимо отметить, что в процессе формирования открытого пространства важно отношение человека (потребителя пространства) с архитектурной искусственной средой.

#### **Научная актуальность вопроса**

Открытые публичные пространства представляются значимым компонентом планировочной системы научно-образовательных центров (НОЦ) –

кампусов, т. к. они служат катализатором формирования академической среды, создают облик НОЦ, отражают уровень развития его академической эффективности. От качественной организации архитектуры и наполненности различными общественными практиками зависит образ НОЦ в целом. Несмотря на то, что открытые общественные пространства предусматриваются в структуре реализованных и проектируемых современных НОЦ [10], остро стоит научная проблема их безадресности, вследствие чего возможной невосребованности.

Проектные архитектурные методы, основанные на учете «человеческого фактора», являются необходимым условием эффективной организации предметно-пространственной среды НОЦ. Архитектура открытых публичных пространств в современных НОЦ должна соответствовать требованиям идентичности, эргономики, комфорта, технологичности и эстетики, а также учитывать их гуманистическую роль<sup>1</sup> и воздействие на человеческий фактор. В научной литературе эти аспекты часто остаются без должного внимания или рассматриваются поверхностно. Изучение, обобщение и систематизация имеющегося опыта, определение современных направлений, разработка научно обоснованных методик и принципов стилистического устройства открытых пространств НОЦ представляют собой актуальную научную задачу.

### **Методология исследования**

При решении научных и проектных вопросов, связанных с формированием открытых пространств, независимо от того, призваны они отражать текущую ситуацию или являются частью процесса проектирования, особое внимание необходимо уделять методам исследования. В настоящей статье автор рассматривает анализ функционального зонирования и развития пространств, феноменологический анализ, географическую концептуализацию пространств. Данные методы позволяют сформулировать антропоцентрические, социофункциональные или системно опосредованные характеристики изучаемой среды НОЦ, но не дают возможности провести комплексную оценку качества пространства. В соответствии с задачами научного исследования создаются предпосылки для научного формирования комбинации существующих методов. Сочетание методов позволяет с максимальной достоверностью исследовать сложные, многофункциональные системы открытых пространств НОЦ. Применение совокупности методов обеспечивает комплексное изучение проблемы и позволяет исследовать социокультурные и архитектурные аспекты, а также качественные характеристики среды.

### **Гипотеза исследования**

Пространство – в данном случае в рамках научно-образовательных центров – это место взаимодействия людей и их физического окружения, где

---

<sup>1</sup> Гуманизм – это философское направление, утверждающее ценность и важность человеческой личности в процессе формирования среды НОЦ. Гуманизм акцентирует внимание на благе человека. Важными аспектами гуманизации открытых пространств являются чувство принадлежности и связи пользователей с архитектурной средой, формирование чувства «места» – ощущение комфорта и принадлежности к среде.

смыслы и ощущение места создаются с помощью социального физического и ментального общения с архитектурной средой (в предположении автора). В данной статье ставится под сомнение зависимость традиционных подходов к проектированию и планированию архитектурной среды от визуального воздействия застроенной среды для создания ощущения места (согласно Г.В. Есаулову [9]). Вместо этого, опираясь на работу датского архитектора и урбаниста Яна Гейла (Jan Gehl), следует подчеркнуть, как усилия по проектированию и планированию для формирования сообщества людей и повседневного использования пространства научно-образовательного центра могут способствовать созданию «балета мест»<sup>2</sup>, делают места яркими и самобытными [11, 12, 13].

### Постановка проблемы исследования

Комплексное архитектурное и междисциплинарное представление НОЦ как уникального, идентичного места академической среды предоставляет необходимую информацию для проектирования и планирования открытого пространства в структуре НОЦ. Учитывая ограниченное научное теоретизирование о НОЦ в целом, следует отметить серьезный недостаток научного положения, лежащего в основе планирования и проектирования архитектуры открытых пространств [3]. Кроме того, существует мало концептуальных научных основ для формирования научно-конструктивной связи между физической формой открытых пространств учебных заведений и их академической, социальной эффективностью.

### Феномен места в архитектурной среде

С архитектурной точки зрения и в представлении широкой публики неизменным условием пребывания в открытом пространстве НОЦ является ощущение места – феномен, при котором построенная и благоустроенная среда воплощает идеализм высшего образования, отражающий особый характер высшей школы. Обычно считается, что результатом архитектурных и планировочных усилий являются красивые, благоустроенные экологические архитектурные пространства с зелеными лужайками и велосипедными и прогулочными дорожками, которые и придают признак ощущения места в НОЦ высших учебных заведений.

Феномен «места» – это часто используемая, но недостаточно изученная концепция в проектировании и планировании архитектуры открытых пространств НОЦ. Тенденция НОЦ учитывать только материальные аспекты места вызывает архитектурную неполноту в плане важности организации сообщества для обучения.

Автор подчеркивает, что человеческий опыт и архитектурный смысл пространства составляют такую же часть НОЦ, как и его физические характеристики.

<sup>2</sup> Термин *place ballet* (балет мест) – это феноменологическое понятие, представленное в научном труде David Seamon (Дэвида Саймона) «A Geography of the Lifeworld» («География жизненного мира»), используемое для описания регулярности места, основанной на привычках и благоприятном физическом окружении. Занимаясь своими повседневными делами, люди собираются вместе в пространстве, которое создает ощущение места. Отдельные участники, использующие одно и то же пространство, непреднамеренно создают более просторное пространство со своим собственным темпом активности и отдыха, личными характеристиками и спокойствием.

### Географическая концептуализация пространств

В рамках географических наук рассмотрим теоретический подход к проектированию и планированию пространства – географическая концептуализация пространства. Согласно профессору В.Н. Калущкову, под концептуализацией географического пространства понимается системная культурная инновация, нацеленная на создание новой географической картины мира. Концептуализация пространства связана с осознанным стремлением к преобразованию пространства путем создания идеологически или статусно новых мест [14].

Важность географической концептуализации места для теории планирования НОЦ подчеркивал Шарпан М. Пергу (Перри Чепмен), утверждавший, что «место сочетает в себе характер обстановки, ее значение для тех, кто ее населяет, и взаимодействия, которые происходят между обстановкой и ее обитателями» [13, с. 119].

В отличие от архитектурных и планировочных подходов, географическая концептуализация пространства исходит из предпосылки, что именно люди придают пространству смысл. С феноменологической точки зрения David Seamon (Дэвид Саймон) рассматривает и описывает, как люди и материальная среда взаимодействуют друг с другом в непрерывных взаимных отношениях, создавая пространство [15]. Автор предполагает, что виды деятельности, традиции общества, социальные связи и время являются одними из атрибутов, которые определяют значимость пространства.

### Феноменологический подход

Согласно М.В. Невлютову, феноменология как инструмент необходима архитектору для решения задач, которые не могут быть решены уже имеющимися инструментами. Он пишет, что обращение к феноменологии заключается в природе проблем, стоящих перед архитектурой [10].

Как считает Kathryn Moore (Кэтрин Мур), окружающее пространство является материальным и духовным и включает в себя материалы, традиции и институты, а также местное окружение, позиционируя пользователей не как наблюдателей «внешнего мира», а как неотъемлемую часть этого мира [16].

Отношения человека с материальным миром обретают смысл, превращая пространство в место. Место – это пространственное выражение жизненного опыта [17].

Идея о том, что все в мире существует во взаимосвязи и непрерывном взаимодействии, оказала сильное влияние на феноменологию архитектуры. Концепция, разработанная немецким философом Мартином Хайдеггером, рассматривает «жилище» как непрерывный, относительный характер бытия в мире, где вещи играют роль «соединителей и сборщиков» [18].

Однако можно предположить, что, вероятно, архитектурная феноменология использовала концепцию жилища, чтобы подчеркнуть необходимость создания органических отношений, основанных на местоположении между архитектурной средой и людьми. Они не статичны, а постоянно развиваются благодаря практике повседневной жизни. Концептуализация жилища, предложенная немецким философом Мартином Хайдеггером, дала возможность архитек-

торам и другим теоретикам рассмотреть роль местоположения и локализации (материальной обстановки) в том, как люди воспринимают это место. Для феноменологического теоретика архитектуры Кристиана-Норберга Шульца ощущение места – это смысл, который возникает из-за самого физического пространства, которое пользователь воспринимает определенным духовным образом. Это сумма физических и символических ценностей природы и окружения человека, объединяющая топографию, освещение, архитектурную среду, а также символический и экзистенциальный смысл [19]. По научным представлениям теоретика архитектуры А. Рапопорта, «феноменология архитектуры имеет дело не с фиксированным знаком, а с переживанием, неотделимым от живого контакта с сооружением» [6].

Взаимосвязанные роли, которые играют местоположение, ощущение места в создании значимого пространства, рассматривал David Seamon (Дэвид Саймон), который исследует концепцию места, воспринимаемого человеком или людьми, с учетом городского планирования и дизайна. В работе [13] рассматривается феноменологическая концепция места, которая определяется как любое место в окружающей среде, объединяющее человеческие действия, опыт и смыслы в пространстве.

### **Предпосылки к созданию архитектуры идентичных открытых пространств**

Со стратегией, основанной на индивидуальном жизненном опыте в поисках обобщаемых паттернов смысла, феноменология, по-видимому, естественным образом должна стать частью планирования открытых пространств и дизайна с обязательством проведения консультаций с общественностью. Однако в настоящее время данное направление не изучено должным образом.

Одним из значимых исследований является анализ Абу-Газзе (Abu-Ghazze), посвященный восприятию пользователями открытого пространства кампуса Иорданского университета. Целью его исследования было изучение того, как люди воспринимают и используют открытые пространства кампуса. Абу-Газзе применял феноменологический подход для определения смысла и значительности открытых пространств и оценивал их с точки зрения предполагаемого дизайна или использования. Объясняя, как такая характеристика, как пол, влияет на восприятие структуры и особенности каждого пространства, он обнаружил значительные различия ощущений пространства среди пользователей [20]. Восприятие различными пользователями формирования архитектурного пространства для их конкретных нужд становится более качественным показателем того, как используется данное пространство (согласно его задуманной архитектурной среде и функциональному назначению или вопреки). Например, студенты Иорданского университета часто предпочитают учиться, а не общаться в местах, предназначенных для отдыха. Для Абу-Газзе эти результаты подчеркивают важность участия пользователей в процессе проектирования кампуса. Хотя он пришел к выводу о необходимости дополнительных исследований, его открытие различных значений пространств кампуса и их влияния на использование позволяет предположить, что феноменологические методы могут быть полезны для разработки, в том числе отечественной, методологии формирования или реорганизации открытых пространств кампусов.

Также в данной тематике представляет научный интерес статья Alison Faith Kelly (Элисон Фейт Келли) и Hilda Mary Mulrooney (Хильда Мэри Малруни), где приведено исследование физических пространств кампусов Великобритании. Авторы заключают, что как пространство кампуса, так и принадлежность к нему признаются важными для большой и разнообразной выборки студентов.

Однако, признавая важность феноменологических методов, следует отметить, что нет конкретного научного подхода для определения значения места, а также теории интеграции их в практику создания мест.

Таким образом, автор статьи подчеркивает важность изучения архитектуры открытых пространств в контексте феномена «места», анализируя конкретное использование пространства различными пользователями и их чувственное восприятие данного архитектурного мира.

### Предпосылки к формированию архитектуры открытых пространств НОЦ

В контексте формирования предпосылок рассмотрим научную работу Ричарда Добера (Richard P. Dober), где анализируется планирование кампуса, в том числе открытого пространства для создания образа, наполненного символизмом [21, 22]. В качестве методологической основы применяются два ключевых компонента – создание мест размещения и плейсмейкинг [23]. В ходе плейсмейкинга изучается, как люди используют конкретное место, и на основании этого выявляются их потребности и желания. Полученная информация применяется для разработки общей концепции или видения данного пространства [24]. Создание мест размещения вдохновляет людей коллективно переосмысливать общественные пространства как центр каждого сообщества. Укрепление связи между людьми и местами, которые они посещают, и формирование мест размещения относится к совместному процессу, с помощью которого мы можем организовывать общественное пространство. Создание пространства не только формирует архитектурный ландшафт, но и способствует определенному использованию пространства, уделяя внимание физической, культурной и социальной идентичности, которая определяет место и поддерживает его непрерывное развитие.

Автор предлагает к рассмотрению **Проект для общественных пространств (PPS)** – это организация, занимающаяся созданием и поддержанием общественных мест, которые формируют сообщества.

Проект общественных пространств школы Мидлсекса (Concord, Massachusetts, США) включал в себя реорганизацию открытых пространств (рис. 1 и 2). При проектировании были проведены интервью, выездные мероприятия и семинары, целью которых был сбор информации и идей от студентов, школьников, преподавателей и сотрудников кампуса. Были запроектированы функциональные группы открытых пространств («круг», «лужайка»), где проводились неформальные мероприятия. Архитекторы выделяют основные функциональные зоны «круг» и «лужайка» как центры общности и товарищества.

Создание пространства сочетается с функциональной разметкой места, «определением, концептуализацией и согласованием определенных физических атрибутов, которые придают кампусу визуальную уникальность, соответствующую его собственной» [25, с. 123]. Существует два четких предположения, опре-

деляющих дизайн и планирование кампусов: во-первых, кампусы – это преимущественно физические объекты, и, во-вторых, ощущение места в кампусе является результатом его материальной, в частности визуальной формы. Например, Daniel R. Kenney и другие авторы утверждали: «Ощущение места создается планом и зданиями, работающими вместе, чтобы определить пространство и установить индивидуальность» [26, с. 27]. Это предположение исходит из всеобъемлющей области городского планирования и дизайна, где ощущение места понимается как продукт специфического городского дизайна и представление времени в форме здания, которые вместе создают визуально узнаваемый характер.



*Рис. 1.* Визуализация открытых пространств школы Мидлсекса – «лужайка». Проект для общественных пространств (PPS)<sup>3</sup>

*Fig. 1.* The lawn in Middlesex School's open air. Project Public Space



*Рис. 2.* Визуализация открытых пространств школы Мидлсекса – «круг». Проект для общественных пространств (PPS)<sup>4</sup>

*Fig. 2.* The circle in Middlesex School's open air. Project Public Space

<sup>3</sup> URL: <https://www.pps.org/> (дата обращения: 26.08.2024)

<sup>4</sup> Там же.

В настоящее время растет интерес к архитектурной взаимосвязи между пространством и местностью в контексте высшего образования, однако этот вопрос остается недостаточно изученным. Научный интерес к этой области охватывает целый ряд дисциплин, включая теорию высшего образования, географию образования, психологию окружающей среды, а также архитектуру, дизайн архитектурной среды и планирование кампусов.

### Заключение

Открытые пространства кампусов и их восприятие места являются результатом взаимодействия людей и физической среды, а не архитектурного детерминизма.

Физическая среда влияет на ощущение места, но она в большей степени является результатом человеческого восприятия, чувств, эмоций и интерпретаций. В соответствии с концепциями телесного субъекта, интенциональности и жизненного мира погружение участников в физическую среду создает смысл и обуславливает поведение.

Особое ощущение кампуса можно создать с помощью мероприятий по планированию и дизайну, которые поддерживают модели использования и последующие межличностные взаимодействия, возникающие из-за того, что разные люди регулярно находятся в одном и том же месте.

В статье акцентируется, что архитектура открытых пространств кампуса должна в первую очередь ориентироваться на сообщества людей. Автор отмечает, что студенты, преподаватели, сотрудники находятся в динамической взаимосвязи с архитектурой открытых пространств и одно никогда не может быть полностью отделено или изолировано от другого.

Данная статья направлена на признание «места» пользователем, что является важным шагом в формировании научного подхода к проектированию и практике создания кампуса, который способствует развитию сообщества. Такое взаимодействие людей и физической среды пересматривает привычное представление о кампусе как об абсолютном пространстве и позволяет фокусироваться на повседневных, рутинных способах, которыми люди используют кампус как часть своего жизненного мира, создавая при этом «балет мест».

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Новиков А.М.* Педагогика : словарь системы основных понятий. Москва : Изд-во ИЭТ, 2013. 268 с.
2. *Соколова М.А.* Формирование образовательных пространств при проектировании университетских кампусов // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2018. № 4 (45). С. 377–401. URL: [http://marhi.ru/AMIT/2018/4kvart18/27\\_sokolova/index.php](http://marhi.ru/AMIT/2018/4kvart18/27_sokolova/index.php)
3. *Попов А.В.* Концепция архитектурного формирования кампусов вузов в России : специальность 2.1.12 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора архитектуры / Попов Алексей Владимирович. Нижний Новгород : Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. 48 с.
4. *Пивоваров Д.В.* Пространство и граница // *Известия Уральского федерального университета*. Сер. 3. Общественные науки. 2016. № 1 (149). С. 152–164.
5. *Затяева Е.К.* Феномен места в архитектурной среде мобильного поселения // *Социально-гуманитарное обозрение*. 2018. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fenomen-mestav-arhitekturnoy-srede-mobilnogo-poseleniya> (дата обращения: 23.09.2024).

6. *Rapoport A.* The meaning of the built environment: a nonverbal communication approach. Beverly Hills : Sage Publications, 1982. 224 p.
7. *Kenney D.R., Dumont R., Kenney G.* Mission and Place: Strengthening Learning and Community through Campus Design. Westport, CT : American Council on Education and Praeger Publishers, 2005. 286 p.
8. *Edwards B.* University Architecture. New York, NY : Spon Press, 2000. 204 p.
9. *Есаулов Г.В.* Об идентичности в архитектуре и градостроительстве // *Academia.* Архитектура и строительство. 2018. № 4. С. 12–18. URL: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2018-4-12-18>
10. *Невлютов М.Р.* Феноменологические концепции современной теории архитектуры // *АМИТ.* 2015. № 3 (32). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fenomenologicheskie-kontseptsii-sovremennoy-teorii-arhitektury> (дата обращения: 26.08.2024).
11. *Gehl J.* Life Between Buildings: Using Public Space. Washington D.C. : Island Press, 2006. 200 p.
12. *Seamon D.* A Geography of the Lifeworld: Movement, Rest, and Encounter. New York : St. Martin's Press, 1979. 227 p.
13. *Seamon D.* The Phenomenological Contribution to Environmental Psychology // *Journal of Environmental Psychology.* 1982. V. 2. № 2. P. 119–140.
14. *Калуцков В.Н.* Концептуализация географического пространства: ономастические аспекты // *Вестник Московского университета. Серия 19. Лингвистика и межкультурная коммуникация.* 2020. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptualizatsiya-geograficheskogo-prostranstva-onomasticheskie-aspekty> (дата обращения: 26.08.2024).
15. *Kelly A., Mulrooney H.* Belonging, the physical space of the university campus and how it is perceived by students: a quantitative analysis among a diverse student group. 2021. URL: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1298352.pdf> (дата обращения: 10.12.2024).
16. *Moore K.* Overlooking the Visual: Demystifying the Art of Design. New York : Routledge. 2010, 272 p.
17. *Seamon D.* Lived Bodies, Place and Phenomenology: Implications for Human Rights and Environmental Justice // *Journal of Human Rights and the Environment.* 2013. V. 4. № 2. 25 p.
18. *Jones O.* Dwelling // *International Encyclopedia of Human Geography* / ed. N. Thrift. Oxford : Elsevier, 2009. 8250 p.
19. *Norberg-Shulz Ch.* Genius Loci: Towards a Phenomenology of Architecture. New York : Rizzoli, 1980. 213 p.
20. *Abu-Ghazze T.M.* Communicating Behavioral Research to Campus Design: Factors Affecting the Perception and Use of Outdoor Spaces at the University of Jordan // *Environment and Behavior.* 1999. V. 31. № 6. P. 764–804.
21. *Dober R.P.* Campus Planning. New York : Reinhold, 1996. 314 p.
22. *Dober R.P.* Campus Design. Ann Arbor, Michigan : Society of College and University Planning, 2003. 304 p.
23. *Byles J.* Taking Back the Streets // *The New York Times.* 2008. April 6. Retrieved 2010. 3 April. URL: <https://www.nytimes.com/2008/04/06/nyregion/thecity/06stre.html> (дата обращения: 10.12.2024).
24. *A Guide to Neighborhood Placemaking in Chicago* // Metropolitan Planning Council, Project for Public Spaces, 2008. URL: [www.placemakingchicago.com/cmsfiles/placemaking\\_guide.pdf](http://www.placemakingchicago.com/cmsfiles/placemaking_guide.pdf) (дата обращения: 01.12.2024).
25. *Seamon D.* Body-Subject, Time-Space Routines, and Place-Ballets // *The Human Experience of Space and Place* / ed. A. Buttimer, D. Seamon. London : Croom Helm, 1980. 204 p.

## REFERENCES

1. *Novikov A.M.* Pedagogy: A Dictionary of a System of Basic Concepts. Moscow: ИЕТ, 2013. Pp. 137. (In Russian)
2. *Sokolova M.A.* Formation of Educational Spaces in Design of University Campuses. *Architecture and Modern Information Technologies.* 2018; 4 (45): 377–401 Available: [http://marhi.ru/АМИТ/2018/4kvart18/27\\_sokolova/index.php](http://marhi.ru/АМИТ/2018/4kvart18/27_sokolova/index.php) (In Russian)

3. Popov A.V. Concept of Architectural Formation of University Campuses in Russia. DSc Abstract. Nizhny Novgorod, 2022. 48 p. (In Russian)
4. Pivovarov D.V. Space and Boundary. *Izvestiya Uralskogo federalnogo universiteta. Ser. 3, Obshchestvennyye nauki*. 2016; 1 (149): 152–164. (In Russian)
5. Zatyayeva Ye.K. The Phenomenon of Place in the Architectural Environment of Mobile Settlement. *Sotsialno-gumanitarnoye obozreniye*. 2018; (3). Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/fenomen-mesta-v-arhitekturnoy-srede-mobilnogo-poseleniya> (accessed September 23, 2024). (In Russian)
6. Rapoport A. *The Meaning of the Built Environment: A Nonverbal Communication Approach*. Beverly Hills: Sage Publications, 1982. 224 p.
7. Kenney D.R., Dumont R., Kenney G. *Mission and Place: Strengthening Learning and Community through Campus Design*. Westport, CT: American Council on Education and Praeger Publishers, 2005. 286 p.
8. Edwards B. *University Architecture*. New York: Spon Press, 2000. 204 p.
9. Esaulov G.V. On Identity in Architecture and Urban Planning. *Academia. arkhitektura i stroitel'stvo*. 2018; (4), 12–18. Available: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2018-4-12-18> (In Russian)
10. Nevlyutov M.R. Phenomenological Concepts of Modern Architectural Theory. *AMIT*. 2015; 3 (32). Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/fenomenologicheskie-kontseptsii-sovremennoy-teorii-arhitektury> (accessed August 26, 2024). (In Russian)
11. Gehl J. *Life Between Buildings: Using Public Space*. Washington D.C.: Island Press, 2006. 200 p.
12. Seamon D. *A Geography of the Lifeworld: Movement, Rest, and Encounter*. New York: St. Martin's Press, 1979. 227 p.
13. Seamon D. The Phenomenological Contribution to Environmental Psychology. *Journal of Environmental Psychology*. 1982; 2 (2): 119–140.
14. Kalutskov V.N. Conceptualisation of Geographical Space: Onomastic Aspects. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 19. Lingvistika i mezhkulturnaya kommunikatsiya*. 2020; (1). Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptualizatsiya-geograficheskogo-prostranstva-onomasticheskie-aspekty> (accessed August 26, 2024). (In Russian)
15. Kelly A., Mulrooney H. Belonging, the Physical Space of the University Campus and How it is Perceived by Students: A Quantitative Analysis Among a Diverse Student Group. 2021. Available: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1298352.pdf> (accessed December 10, 2024).
16. Moore K. *Overlooking the Visual: Demystifying the Art of Design*. New York: Routledge, 2010. 272 p.
17. Seamon D. Lived Bodies, Place and Phenomenology: Implications for Human Rights and Environmental Justice. *Journal of Human Rights and the Environment*. 2013; 4 (2): 25.
18. Jones O. Dwelling. In *International Encyclopedia of Human Geography*, N. Thrift, Ed. 2009. 8250 p. Oxford: Elsevier.
19. Norberg-Shulz Ch. *Genius Loci: Towards a Phenomenology of Architecture*. New York: Rizzoli, 1980. 213 p.
20. Abu-Ghazze T.M. Communicating Behavioral Research to Campus Design: Factors Affecting the Perception and Use of Outdoor Spaces at the University of Jordan. *Environment and Behavior*. 1999; 31 (6): 764–804.
21. Dober R.P. *Campus Planning*. New York: Reinhold, 1996. 314 p.
22. Dober R.P. *Campus Design*. Ann Arbor, Michigan: Society of College and University Planning, 2003. 304 p.
23. Byles J. Taking Back the Streets, in *The New York Times*, April 6, 2008, retrieved 3 April 2010. Available: [www.nytimes.com/2008/04/06/nyregion/thecity/06stre.html](http://www.nytimes.com/2008/04/06/nyregion/thecity/06stre.html) (accessed December 10, 2024).
24. A Guide to Neighborhood Placemaking in Chicago. Metropolitan Planning Council, Project for Public Spaces, 2008. Available: [www.placemakingchicago.com/cmsfiles/placemaking\\_guide.pdf](http://www.placemakingchicago.com/cmsfiles/placemaking_guide.pdf) (accessed December 1, 2024).
25. Buttimer A., Seamon D. (Eds.) *Body-Subject, Time-Space Routines, and Place-Ballets*. In *The Human Experience of Space and Place*. London: Croom Helm, 1980. 204 p.

**Сведения об авторе**

*Вавулин Константин Евгеньевич*, научный сотрудник, Государственный университет по землеустройству, 105064, г. Москва, ул. Казакова, 15, [konstantin.vavulin@mail.ru](mailto:konstantin.vavulin@mail.ru)

**Author Details**

*Konstantin E. Vavulin*, Research Scientist, State University of Land Use Planning, 15, Kazakov Str., 105064, Moscow, Russia, [konstantin.vavulin@mail.ru](mailto:konstantin.vavulin@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 09.10.2024  
Одобрена после рецензирования 01.11.2024  
Принята к публикации 14.11.2024

Submitted for publication 09.10.2024  
Approved after review 01.11.2024  
Accepted for publication 14.11.2024

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

## BUILDING AND CONSTRUCTION

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 6. С. 71–81.

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 (6): 71–81.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

### НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.644.02:539.376.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-71-81

EDN: FKJQMK

## ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ

Олег Александрович Курасов<sup>1</sup>, Александр Сергеевич Шредер<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. Обеспечение производственной безопасности и повышение надежности газопроводных систем, в частности компрессорных станций, с помощью применения комплексного диагностирования, математического моделирования и комбинированного анализа данных позволяет своевременно определять и прогнозировать изменения в состоянии опасных производственных объектов, предотвращать отказы и деформации промышленной инфраструктуры, а также снижать риски разрушения инженерных конструкций и появления дефектов при транспортировке углеводородов.

**Цель.** Изучение влияния внешних нагрузок, вызванных сезонными изменениями грунта и низкочастотной вибрацией, на напряженно-деформированное состояние трубопроводной обвязки электрических газоперекачивающих агрегатов.

**Методы исследования.** Проведение комплексного диагностирования с использованием продуктов инженерного анализа и программных средств для исследования напряженно-деформированного состояния технологической обвязки компрессорной станции.

**Результаты.** Приведен анализ влияния низкочастотных вибраций на техническое состояние трубопроводной обвязки компрессорной станции. Произведены геодезические измерения и оценка перемещений трубопроводов компрессорной станции вследствие воздействия на них элементов опорной системы и грунтов. Для рассмотрения нагружения трубо-

проводной обвязки за счет изменения высотных отметок создана численная модель в программном комплексе ANSYS Workbench для выявления потенциально опасных участков.

**Ключевые слова:** технологический трубопровод, высотные отметки, напряженно-деформированное состояние, температурный перепад, продольные напряжения, программное обеспечение, вибродиагностика

**Для цитирования:** Курасов О.А., Шредер А.С., Бурков П.В. Влияние динамических процессов на техническое состояние строительных конструкций компрессорной станции // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 71–81. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-71-81. EDN: FKJQMK

## ORIGINAL ARTICLE

### DYNAMIC PROCESSES AFFECTING STRUCTURAL INTEGRITY OF COMPRESSOR PLANT

Oleg A. Kurasov<sup>1</sup>, Aleksandr S. Shreder<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.** Integrated diagnostics, mathematical simulation and combined data analysis provide an industrial safety and improve the reliability of pipeline systems, in particular compressor plants. It allows to timely determine and predict changes in pipeline connections to prevent failures and deformations of the industrial infrastructure and reduce the risk of its destruction and defect formation during hydrocarbon transportation.

**Purpose:** The aim of the work is to study the influence of external loads caused by seasonal soil changes and low-frequency vibration on the stress-strain state of pipelines of electric gas-compression units.

**Methodology:** Complex diagnostics using engineering analysis and software for the stress-strain state of the connection integrity. Geodetic measurements of pipeline displacements.

**Research findings:** It is shown how low-frequency vibrations affect the integrity of compressor plant connections. Pipeline displacements due to the influence support system elements and soils are determined. Pipeline connection loading due to changes in elevation points is considered in the proposed numerical model created in the ANSYS finite element program to identify potentially hazardous areas.

**Keywords:** pipeline, elevation points, stress-strain state, temperature difference, longitudinal stress, finite element program, vibrodiagnostics

**For citation:** Kurasov O.A., Shreder A.S., Burkov P.V. Dynamic Processes Affecting Structural Integrity of Compressor Plant. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (6): 71–81. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-71-81. EDN: FKJQMK

## Введение

Энергообеспечение в значительной мере зависит от газовой промышленности. Для повышения эффективности транспортировки газа в отдаленные и труднодоступные районы требуются усовершенствование и улучшение систем управления трубопроводами (ТП). Газ доставляется потребителям по связанной сети труб и технических сооружений, составляющих газотранспортную систему

(ГТС) [1]. Гидравлические потери при транспортировке газа приводят к снижению давления на больших расстояниях, в результате чего пластовое давление становится недостаточным для транспортировки газа по трубопроводам. Компрессорная станция (КС) играет важнейшую роль в ГТС, поскольку обеспечивает сжатие газа и поддерживает необходимый расход при транспортировке.

В дополнение к технологиям транспортировки газообразных углеводородов особое внимание уделяется вопросам производственной безопасности объектов трубопроводного транспорта природного газа, в том числе КС. Ростехнадзор предъявляет жесткие требования к процессам перекачки и управления, а также к использованию математических методов для описания изменений состояния объектов [2].

Большинство газопроводных систем топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России, по которым транспортируется природный газ, эксплуатируются более 30 лет. В процессе реконструкции чаще всего уделяют большее внимание замене старых газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на более новые, а технологические ТП подлежат замене реже. Поэтому становится актуальным вопрос диагностики и контроля за техническим состоянием трубопроводной обвязки (ТПО) ГТС.

Обеспечение долгосрочной, надежной работы и минимизация отказов КС является одним из ключевых аспектов при транспортировке углеводородов в газовой отрасли. Для решения этой задачи необходимы комплексные программы диагностики и инженерного анализа для математического моделирования. Они позволяют оценивать усталостную прочность системы, прогнозировать изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) конкретных высоконагруженных конструктивных элементов опасных производственных объектов, предотвращать отказы, разрушения инженерных сооружений и неисправности [3].

Для качественной оценки поведения и характеристик объекта исследования в динамике используется комбинированный подход. Он предполагает объединение данных о состоянии технологического оборудования или ТП и изменении его за определенный период времени. При этом изучается влияние различных нагрузок на деформацию ТП и оборудования [4].

Российская газовая отрасль сталкивается со множеством задач, направленных на обеспечение безопасности трубопроводных систем, поскольку в разных местах могут происходить нежелательные явления. Одно из таких явлений – смещение ТП в регионах с особыми гидрогеологическими и геологическими условиями, где элементы трубопроводных систем взаимодействуют с грунтами с малой несущей способностью. В таких случаях трубопроводно-грунтовая система деформируется, изменяя свое НДС, что может приводить к авариям и сбоям. Проблема укрепления грунтовой основы остается актуальной, и решение этой задачи состоит в разработке новаторских подходов и модернизации существующих методов [5].

Одним из ключевых критериев оценки поведения ТП и оборудования является анализ изменения их НДС из-за основных и дополнительных нагрузок на исследуемую систему. Такие изменения особенно заметны в болотистых районах и на территориях с многолетнемерзлыми грунтами. Требуется проведение диа-

гностических работ для своевременного предотвращения аварий из-за изменения НДС, а также прогнозирование поведения исследуемых объектов [6, 7].

Статические нагрузки вызваны рабочим давлением, температурой и недостатками монтажа. Периодические статические нагрузки связаны с колебаниями давления, температурными деформациями и заменой оборудования во время профилактического обслуживания. Низкочастотные динамические нагрузки возникают из-за пульсаций давления в трубах. Высокочастотные нагрузки создаются источниками механической вибрации и пульсирующим потоком жидкости [8, 9].

Динамические нагрузки могут вызывать усталостные разрушения в трубопроводных системах и оборудовании. Для решения этих проблем необходимо оценить такие характеристики, как качество материалов, конструкция и условия эксплуатации, чтобы гарантировать надежность и безопасность системы. Регулярные осмотры и методы технического обслуживания жизненно важны для раннего выявления признаков износа или повреждения и предотвращения катастрофических поломок.

Гидравлический удар может создавать кратковременные высокочастотные нагрузки. Динамическое воздействие на ТП можно разделить на две категории: силовое и кинематическое возбуждение. Кинематическое возбуждение, согласно ГОСТ 24346–80, вызывает колебания системы путем придания заданных движений определенным участкам, не зависящим от состояния системы. Эти колебания создаются требуемым периодическим перемещением отдельных точек оси ТП. ТП технологической обвязки КС испытывает значительные балочные колебания из-за наличия внешних и внутренних источников кинематического возбуждения и нефункциональных опор [10, 11, 12].

Безопасная эксплуатация технологических трубопроводов КС имеет решающее значение для транспортировки газа. ТП работают в сложных условиях, и аварии могут привести к значительным экономическим и экологическим последствиям, а также человеческим жертвам. Для обеспечения надежности и безопасности существенная реконструкция и модернизация оборудования может оказаться дорогостоящей и нецелесообразной. Для того чтобы избежать аварийных сценариев, связанных с изменением НДС ТП [13, 14], необходимо оперативно проводить различные диагностические мероприятия. Реализация программы прогнозируемого технического обслуживания позволяет выявлять и устранять потенциальные проблемы до того, как они перерастут в аварийные ситуации. Принятие упреждающих мер по поддержанию целостности технологических трубопроводов КС необходимо для обеспечения безопасной и эффективной работы по транспортировке газа.

Для обеспечения эффективного планирования технического обслуживания, строительства и восстановительных работ важно проводить прогнозную оценку поведения исследуемого объекта. Полученная информация также может быть использована для корректировки расчетных данных в соответствии с методическими рекомендациями и требованиями научно-технической документации на трубопроводные конструкции [15, 16, 17].

Таким образом, целью настоящего исследования является оценка влияния поперечных напряжений на основе проведенных измерений изменения вы-

сотных отметок технологического ТП КС от проектных на НДС ТП с помощью программного обеспечения [18]. Необходимо выполнить следующие задачи:

- измерить вибрации и высотные отметки;
- оценить НДС технологического ТП;
- определить наиболее опасные участки;
- дать рекомендации по уменьшению нагрузок.

#### Постановка задачи, методы исследования

Объектом исследования является ТПО КС, входящая в состав томской ГТС. В ходе эксплуатации ТПО подвергается сезонным колебаниям высот, а также возможной деформации ТП вследствие комплексного воздействия разрушающих факторов на обвязку, что приводит к росту механических напряжений в ней. На рис. 1 показаны реперные точки фундамента электрического газоперекачивающего агрегата (ЭГПА), изменения высотных отметок которых было измерено с использованием нивелира.

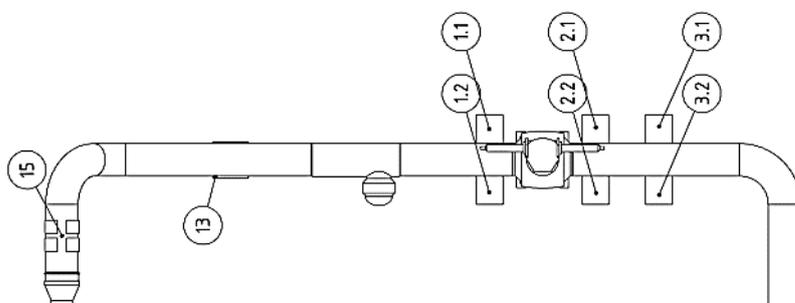


Рис. 1. Схема расположения контрольных точек фундаментов ГПА

Fig. 1. Schematic of reference point arrangement of gas-compressor unit foundations

Обследование одной из обвязки ТП ЭГПА показало относительно большое изменение проектного положения ТПО линии всасывания, которое в совокупности с воздействующими факторами на объект может приводить к значительным механическим напряжениям, влияющим на НДС технологической обвязки (рис. 2).

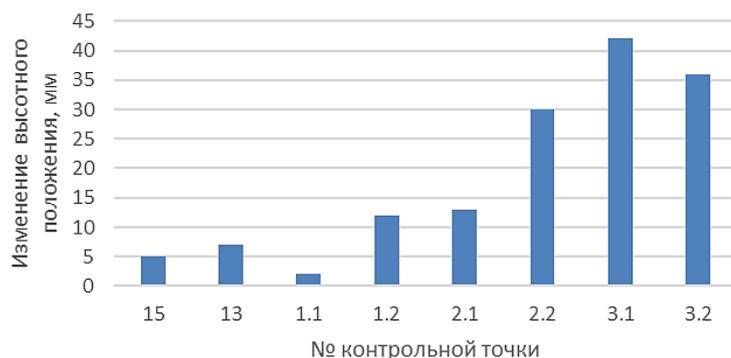


Рис. 2. Изменения высотного положения контрольных точек ГПА

Fig. 2. Block-diagram of elevation points for gas-compressor unit

Для оценки НДС в непроецированном положении с возможным кинематическим нагружением была смоделирована обвязка всасывающего нагнетателя в ANSYS Workbench. Расчеты проводились при задании номинальных рабочих нагрузок. Обвязка представляет собой систему с отводами, тройниками и запорной арматурой (рис. 3). Разработка конечно-элементной модели была подготовлена на основе следующих исходных данных:

- проектные чертежи ТП основного назначения;
- исполнительная схема фундаментов и проектные чертежи опор ТПО ЭГПА;
- сертификаты качества на трубы и соединительные фасонные изделия;
- паспорта на запорно-регулирующую арматуру;
- исполнительная схема сварных стыков ТП;
- параметры эксплуатации ТП на номинальном и рабочем режимах (давление 5,4 МПа и температура транспортируемого газа, перепад температур  $\Delta T = 60$  °С) [13].

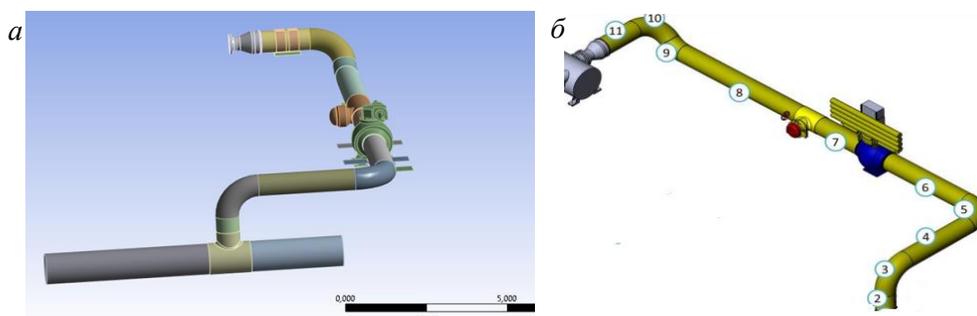


Рис. 3. Математическая модель технологического ТП (а); нумерация элементов ТПО (б)  
 Fig. 3. Mathematical model of piping (a); piping element numbering (b)

### Обсуждение результатов исследования

По результатам расчетного моделирования получены следующие значения максимальных продольных напряжений в ТП от расчетных нагрузок и воздействий  $\sigma_{пр}$  (МПа), рассчитанные согласно СНиП 2.05.06–85\* (таблица).

Как видно по данным таблицы, расчетные значения, полученные с помощью программного обеспечения, являются относительно большими, а в отводе под номером 3 продольные напряжения от расчетных нагрузок находятся на границе с предельно допустимыми и равны 159 МПа. В таком случае стоит вопрос о разрешении работы ЭГПА на номинальных режимах и требовании проведения дополнительного диагностирования. В процессе моделирования были учтены только статические составляющие, без учета динамики. Если анализировать влияние различных факторов на возникновение напряжений в ТПО, то могут наложиться и другие ограничения на режим эксплуатации КС. В процессе работы ГПА возникают динамические нагрузки, представленные в виде вибрации, которые понижают надежность трубопроводной арматуры. Эти нагрузки можно выразить через среднеквадратичные значения (СКЗ) виброскорости в характерных точках ТПО ГПА.

Таблица продольных напряжений ТПО  
Longitudinal stresses of piping connections

№ элемента	Элемент ТПО	Максимальные расчетные продольные напряжения в трубопроводе, МПа		Максимальные продольные напряжения в трубопроводе от расчетных нагрузок и воздействий $\sigma_{пр}$ , МПа	
		Растяжение	Сжатие	Растяжение	Сжатие
Отводы					
3	720×16	159	-9	159	-68
5		81	0		
9		76	0		
10		87	0		
Трубы					
2	720×16	180	-9	252	-163
4		133	0		
6		117	-61		
7		102	0		
8		100	0		
11		98	0		

Были зафиксированы значения вибрации в характерных точках ТПО исследуемого объекта (рис. 4) в частотном диапазоне от 4 до 2500 Гц. Эксплуатационные характеристики ГПА: давление газа на входе нагнетателя – 3,58 МПа, на выходе – 4,40 МПа. Температура газа на входе нагнетателя – 2 °С, на выходе – 19 °С. Степень сжатия – 1,224. Измерения проводились виброметром типа SKF Microlog CMXA 70, датчик типа CMSS2200. Замеры проводились во взаимно перпендикулярных направлениях: горизонтальном (четный номер точки) и вертикальном (нечетный номер точки).

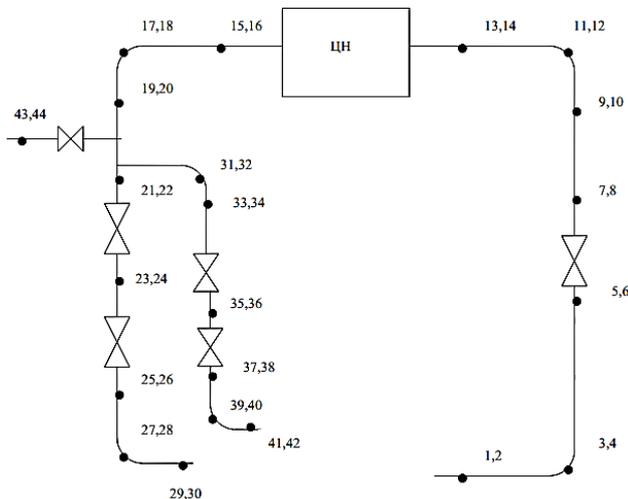


Рис. 4. Схема расположения точек измерения вибрации ТПО  
Fig. 4. Arrangement of measurement points for piping vibrations

Значения виброскорости в характерных точках показаны на рис. 5.

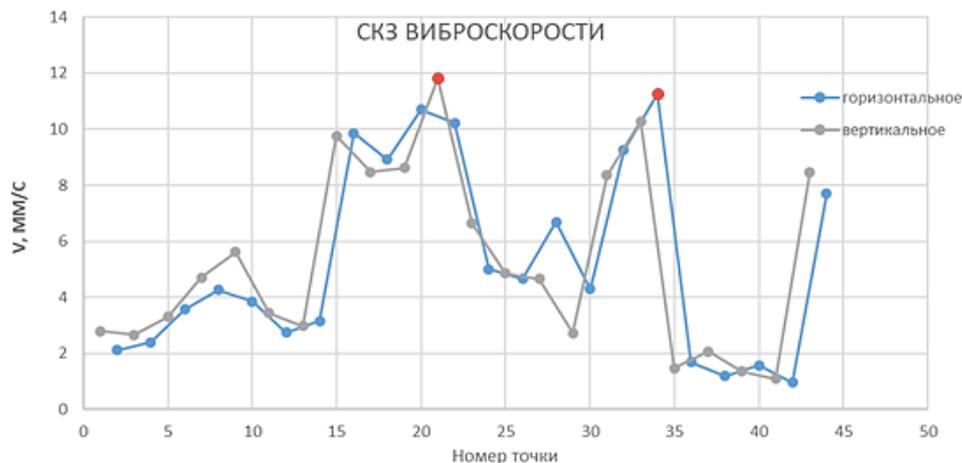


Рис. 5. Значения виброскорости в характерных точках  
Fig. 5. Vibration velocity values at certain points

Исследование показало, что уровень СКЗ виброскорости в точках 21 и 34 превышает допустимые нормы. Нормы показателей виброскорости для ТПО, согласно нормативным документам (СТО Газпром 2-2.3-324-2009): допустимо – до 11,2 мм/с; требует принятия мер – от 11,2 до 18 мм/с; недопустимо – свыше 18 мм/с.

По данным, приведенным на рис. 5, видно изменение значений виброскорости по всему участку, а именно совпадение тенденции изменения виброскорости как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях, а также резкое увеличение значений виброскорости в точках, близлежащих к ГПА, и на участках с зарождением пульсаций давления в тупиковых ответвлениях [18].

### Заключение

Таким образом, для достижения поставленных целей в ходе проведенного исследования выполнены следующие задачи и получены результаты:

– Произведены замеры изменения высотных положений ТПО ГПА, выполнены расчеты статического нагружения при нормальных рабочих нагрузках в программном обеспечении ANSYS Workbench, которые показали повышенные значения продольных напряжений относительно расчётных. На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что работа при номинальном режиме крайне опасна.

– Осуществлены замеры вибрации ТПО ГПА, которые выявили превышение допустимых норм согласно СНиП 2.05.06-85\*. Для более глубокого исследования влияния динамических процессов на ТПО ГПА необходимо на основе полученных данных провести дополнительное программное моделирование для оценки параметров вибрации ТПО.

Полученные результаты говорят о повышенном износе технологического оборудования и требуют дополнительного исследования, в рамках которого

планируется произвести модальный газодинамический расчет в программном обеспечении для выяснения влияния потока газа в ТПО ГПА.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *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, ТП 2021, Saint Petersburg, 31 мая – 06 июня 2021 г. V. 266. EDP Sciences : EDP Sciences, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202126601012. EDN: VJQECF
2. *Коршаков А.А., Коробков Г.Е., Душин В.А., Набиев Р.Р.* Обеспечение надежности магистральных трубопроводов. Уфа : ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2000. 170 с.
3. *Burkov P.V., Burkova S.P., Knaub S.A.* Stress and Strain State Analysis of Defective Pipeline Portion // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Yurga, 21–23 мая 2015 г. V. 91. Yurga : Institute of Physics Publishing, 2015. P. 012055. DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012055. EDN: VALAEN
4. *Антропов П.Г., Долинина О.Н., Кузьмин А.К., Шварц А.Ю.* Использование интеллектуальных систем для диагностики неисправностей газоперекачивающих агрегатов // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 115. EDN: RVCPLD
5. *Жданова Ю.Ю.* Повышение надежности работы компрессорной станции путем стабилизации пространственного положения трубопроводной обвязки электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Проблемы геологии и освоения недр : труды XXV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию горно-геологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания Томского политехнического университета, Томск, 5–9 апреля 2021 г. Т. 2. Томск, 2021. С. 404–406.
6. *Рамазанов Р.М., Рамазанов М.И., Губайдуллин К.Ж.* Диагностирование состояния трубопроводных обвязок компрессорных станций // Достижения науки и образования. 2020. № 2 (56). С. 5–10.
7. *Короленок А.М., Левитский Д.Н., Лопатин А.С. и др.* Совершенствование технического обслуживания и ремонта оборудования компрессорных станций // Магистральные и промышленные трубопроводы: проектирование, строительство, эксплуатация и ремонт. Том 1. Москва : Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2005. С. 6–21. EDN: XCBIDR
8. *Курасов О.А.* Совершенствование методов оценки технического состояния магистральных газопроводов на основе физико-математического моделирования // Инновационные процессы в науке и технике XXI века. Том 2. Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2023. С. 248–250. EDN: VFUIMV
9. *Kurasov O.A., Burkov P.V.* Risk assessment and ranking after design improvement of the gas transmission system // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources : Scientific conference abstracts, St Petersburg, 17–19 июня 2020 г. V. 1. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский горный университет, 2020. С. 111–112. EDN: PKXKIP
10. *Котов С.С., Воронин К.С.* Анализ факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние технологических трубопроводов на компрессорной станции // Тюменский научный журнал. 2024. № 2. С. 18–24. DOI: 10.24412/3034-154X-2024-2-18-24
11. *Семушкин А.В., Подлозный А.О., Черникова Е.А., Щуровский В.А.* Методические принципы параметрической диагностики технического состояния газотурбинных газоперекачивающих агрегатов // Вести газовой науки. 2017. № 1 (29). С. 22–31. EDN: ZHROJR
12. *Микаэлян Э.А.* Особенности применения вибродиагностики газоперекачивающих агрегатов при эксплуатации // Газовая промышленность. 2011. № 2 (656). С. 68–72. EDN: NCJQRH
13. *Ванчин А.Г.* Выбор оптимальной последовательности диагностирования центробежного нагнетателя в условиях компрессорной станции магистрального газопровода // Нефтегазовое дело. 2012. Т. 10. № 1. С. 31–35. EDN: PATHUN
14. *Паранук А.А., Буякин А.В., Румянцев С.В., Субочев О.Г.* Разработка методики диагностирования узлов газоперекачивающего агрегата по данным вибродиагностики // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 6-2. С. 270–276. DOI 10.17513/snt.38733. EDN: FDQWNX

15. *Хайруллина Р.Р., Валеев А.Р.* Оценка негативного воздействия низкочастотных вибраций на технологические трубопроводы компрессорных станций // *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья.* 2020. № 5–6. С. 23–28. DOI:10.24411/0131-4270-2020-6-23-28
16. *Решетов А.А.* Моделирование как средство повышения эффективности вибродиагностического контроля газоперекачивающих агрегатов // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.* 2013. № 8. С. 40–51. EDN: SQKXJD
17. *Устюжанин А.В., Свердлик Ю.М., Репин Д.Г.* Применение акустического анализа для исследования возбудимости тупиковых ответвлений в обвязках компрессорных станций // *Газовая промышленность.* 2018. № 11. С. 42–49.
18. *Ковязин А.В.* Оценка напряженно-деформированного состояния трубопроводной обвязки центробежного нагнетателя // *Вестник науки и образования.* 2020. № 25-1 (103). С. 15–19.

## REFERENCES

1. *Kurasov O.A., Burkov P.V.* Substantiation of Methods of Improving Safety of Pipeline Gas Transportation. In: *Proc. E3S Web of Conferences '2021 Topical Issues of Rational Use of Natural Resources'*, Saint-Petersburg, 2021. V. 266. DOI:10.1051/e3sconf/202126601012. EDN: VJQECF
2. *Korshak A.A., Korobkov G.E., Dushin V.A., Nabiev R.R.* Reliability of Main Pipelines. Ufa: ООО "DizainPoligrafServis", 2000. 170 p. (In Russian)
3. *Burkov P.V., Burkova S.P., Knaub S.A.* Stress and Strain State Analysis of Defective Pipeline Portion. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2015; 91: 012055. DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012055. EDN: VALAEN
4. *Antropov P.G., Dolinina O.N., Kuz'min A.K., Shvarts A.Yu.* Intelligent Systems for Diagnostics of Gas Compressor Faults. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya.* 2013; (6): 115. EDN: RVCPLD (In Russian)
5. *Zhdanova Yu.Yu.* Reliability Improvement of Compressor Station by Stabilizing Spatial Position of Pipeline Connections of Electric-Driven Gas Pumping Units. In: *Proc. 25th Int. Sci. Symp. 'Problems of Geology and Subsoil Development'*, vol. 2. Tomsk, 2021. Pp. 404–406. (In Russian)
6. *Ramazanov R.M., Ramazanov M.I., Gubaidullin K.Zh.* Diagnostics of Compressor Station Pipelines. *Dostizheniya nauki i obrazovaniya.* 2020; 2 (56): 5–10. (In Russian)
7. *Korolenok A.M., Levitskii D.N., Lopatin A.S., et al.* Maintenance and Repair Improvement of Compressor Station Equipment. In: *Main and Field Pipelines: Design, Construction, Operation and Repair*, V. 1. Moscow, 2005. Pp. 6–21. EDN: XCBIDR (In Russian)
8. *Kurasov O.A., Burkov P.V.* Evaluation Improvement of Technical Condition of Main Gas Pipelines Using Physical and Mathematical Modeling. *Innovatsionnye protsessy v nauke i tekhnike XXI veka.* 2023; (2): 248–250. EDN: VFUIMV (In Russian)
9. *Kurasov O.A., Burkov P.V.* Risk assessment and ranking after design improvement of the gas transmission system. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Topical Issues of Rational Use of Natural Resources'*, Saint-Petersburg, 17–19 June 2020. vol. 1. 2020. Pp. 111–112. EDN: PKXKIP
10. *Kotov S.S., Voronin K.S.* Analysis of Factors Influencing Stress-Strain State of Compressor Station Pipelines. *Tyumenskii nauchnyi zhurnal.* 2024; (2): 18–24. DOI: 10.24412/3034-154X-2024-2-18-24 (In Russian)
11. *Semushkin A.V., Podloznyi A.O., Chernikova E.A., Shchurovskii V.A.* Methodology of Parametric Diagnostics of Technical Condition of Gas Turbine Gas Pumping Units. *Vesti gazovoi nauki.* 2017; 1 (29): 22–31. EDN: ZHROJR (In Russian)
12. *Mikaelyan E.A.* Vibration Diagnostics of Gas Pumping Units During Operation. *Gazovaya promyshlennost'.* 2011; 2 (656): 68–72. EDN: NCJQRH (In Russian)
13. *Vanchin A.G.* Selection of Best Diagnostics of Centrifugal Blower of Compressor Station of Main Gas Pipeline. *Neftegazovoe delo.* 2012; 10 (1): 31–35. EDN: PATHUN (In Russian)
14. *Paranuk A.A., Bunyakin A.V., Rummyantsev S.V., Subochev O.G.* Methodology Development of Diagnostics of Gas Pumping Unit Components Based on Vibrodiagnostic Data. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii.* 2021; (6-2): 270–276. – DOI: 10.17513/snt.38733. EDN: FDQWNX (In Russian)
15. *Khairullina R.R., Valeev A.R.* Negative Impact from Low-Frequency Vibrations on Process Pipelines of Compressor Stations. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya.* 2020; (5–6): 23–28. DOI:10.24411/0131-4270-2020-6-23-28 (In Russian)

16. Reshetov A.A. Modeling as a Means of Increasing the Efficiency of Vibration Diagnostic Control of Gas Pumping Units. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*. 2013; (8): 40–51. EDN: SQKXJD (In Russian)
17. Ustyuzhanin A.V., Sverdlik Yu.M., Repin D.G. Acoustic Analysis in Investigation of Excitability of Compressor Plant Connections. *Gazovaya promyshlennost'*. 2018; (1): 42–49. (In Russian)
18. Kovyazin A.V. Stress-Strain State of Pipeline Connections of Centrifugal Blower. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2020; 103 (25-1); 15–19. (In Russian)

#### Сведения об авторах

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

*Шредер Александр Сергеевич*, аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, ass106@tpu.ru

*Бурков Петр 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

*Aleksandr S. Shreder*, Research Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, ass106@tpu.ru

*Petr V. Burkov*, DSc, Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, Tomsk State University of Architecture and Building, 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 19.02.2024  
Одобрена после рецензирования 14.06.2024  
Принята к публикации 31.10.2024

Submitted for publication 19.02.2024  
Approved after review 14.06.2024  
Accepted for publication 31.10.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 6. С. 82–98.

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 (6): 82–98.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.075.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-82-98

EDN: GJPNKQ

## УСТОЙЧИВОСТЬ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТЕРЖНЕЙ С СЕРДЕЧНИКОМ В ВИДЕ ДВУТАВРА

**Денис Владимирович Конин**

*АО «НИЦ "Строительство"», г. Москва, Россия*

**Аннотация.** *Актуальность.* Рассмотрены исследования учета продольного изгиба в сжатых железобетонных и сталежелезобетонных стержнях. Установлено, что значительная часть исследований связана с испытаниями железобетонных конструкций с низким процентом армирования. Кроме того, испытания конструкций на устойчивость не выполнялись для новых высокопрочных бетонов.

*Цель работы* – установить действительные значения коэффициента продольного изгиба для сталежелезобетонных стержней различной гибкости из современных бетонов.

*Методы.* Запроектированы и испытаны стойки различной гибкости с процентом армирования около 10 %. Созданы конечно-элементные модели конструкций, подобные испытанным.

*Результаты.* По результатам испытаний установлено, что коэффициенты продольного изгиба в нормах существенно завышены и не дают запас при инженерном расчете конструкций, что подтверждается и конечно-элементными моделями конструкций. Разброс по большим гибкостям сталежелезобетонных конструкций может достигать 38 %.

*Выводы.* Предложена новая кривая коэффициента продольного изгиба для конструкций на всем диапазоне гибкостей от  $l_0/h = 6$  до  $l_0/h = 20$  при кратковременном действии нагрузки. Предложенная кривая имеет нелинейный характер, что соответствует теоретическим предпосылкам.

*Научная новизна.* Проведены систематизированные исследования устойчивости сталежелезобетонных стержней на широком диапазоне гибкостей.

**Ключевые слова:** бетон, высокопрочный бетон, сталь, сталежелезобетонная конструкция, жесткая арматура, внецентренное сжатие, устойчивость, коэффициент продольного изгиба

**Для цитирования:** Конин Д.В. Устойчивость сталежелезобетонных стержней с сердечником в виде двутавра // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 82–98. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-82-98. EDN: GJPNKQ

## ORIGINAL ARTICLE

**STABILITY OF STEEL REINFORCED RODS WITH I-BEAM CORE****Denis V. Konin***Koucherenko Central Research Institute of Civil Structures, Moscow, Russia*

**Abstract. Purpose:** The purpose of the work is to determine the longitudinal bending coefficient for steel reinforced rods of various flexibility.

**Methodology:** Design and testing of rods with various flexibility with about 10 % reinforcement. Creation of FE models of structures similar to the tested ones.

**Research findings:** Test results show that coefficients of longitudinal bending in rods are significantly overestimated and do not provide a margin for the structural analysis, which is confirmed by the FE models. The value spread in can reach 38 %.

**Value:** The dependence of longitudinal bending coefficient is suggested for structures over the entire range of flexibility from  $l_0/h = 6$  to  $l_0/h = 20$  under the dynamic load. The proposed non-linear curve corresponds to theoretical calculations. Systematic studies concern the stability of steel reinforced rods in a wide range of flexibility.

**Keywords:** concrete, high-strength concrete, steel, composite structure, rigid reinforcement, eccentrically compressed, stability, longitudinal bending coefficient

**For citation:** Konin D.V. Stability of Steel Reinforced Rods with I-Beam Core. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (6): 82–98. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-82-98. EDN: GJPNKQ

**Введение**

Согласно СП 266.1325800.2016, коэффициент  $\varphi$  следует принимать при длительном действии нагрузки по таблице в зависимости от гибкости элемента и класса прочности бетона на сжатие, а при кратковременном действии нагрузки – по линейному закону, принимая  $\varphi = 0,9$  при  $\frac{l_0}{h} = 10 (\lambda = 34,5)$  и  $\varphi = 0,85$  при  $\frac{l_0}{h} = 20 (\lambda = 69)$ , где  $l_0$  – расчетная длина элемента;  $h$  – размер поперечного сечения в плоскости определения коэффициента  $\varphi$ .

Сталежелезобетонные конструкции, в особенности работающие на сжатие или на сжатие с изгибом, были широко исследованы в первой половине XX в. в СССР [1]. Имелись испытания для тонкостенных двутаров и клепаных составных конструкций, обетонированных бетонами и пескобетонами низкой, по современным представлениям, прочности. В середине и второй половине XX в. также были проведены работы по изучению устойчивости железобетонных и сталежелезобетонных стержней Э.Л. Житницкой [2], Н.А. Славинским, С.К. Микадзе, Н.А. Егоровым [3], Р.Х. Каюмовым [4], А.Н. Бамбурой [5], В.В. Гичко [6], В.В. Ханджи [7] и др. На основе экспериментов, выполненных Н.А. Егоровым, были разработаны положения по расчету сталежелезобетонных стоек, вошедших в «Руководство по проектированию железобетонных конструкций с жесткой арматурой», опубликованное в 1978 г. [8]. В данном до-

кументе влияние продольного изгиба в сжатых элементах учитывалось введением в расчет случайного эксцентриситета, как для железобетонной конструкции ( $e = \frac{h}{30}$  или  $\frac{l}{600}$ ), а также с учетом влияния прогибов от действия сжимающих нагрузок путем введения коэффициента  $\eta = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}}$ . Отдельно установленного коэффициента  $\varphi$  в руководстве не было [8].

Вопросы теории устойчивости железобетонных стержней без жесткого армирования были рассмотрены А.Д. Бегловым и Р.С. Санжаровским с соавторами [9, 10, 11, 12, 13]. В частности, в работе [13] рассмотрены и проанализированы кривые зависимости коэффициентов  $\varphi$  для колонн различной гибкости для случая внецентренно сжатых и имеющих случайные эксцентриситеты стоек. Предложена модель расчета сжато-изогнутых стержней путем введения коэффициента продольного изгиба, обозначенного  $k$ , а также безразмерного коэффициента  $\frac{1+k_{\mu}}{1+3m_{\mu}}$ , учитывающего влияние прочности бетона и арматуры, начальных модулей деформации бетона и арматуры, процента армирования поперечного сечения. Показана сходимость предлагаемого метода расчета с экспериментами для железобетонных конструкций, выполненными Е.А. Чистяковым [14] и его соавторами, а также сопоставление с Eurocode 2: Design of concrete structures.

В работе [14] Е.А. Чистякова и материалах других авторов исследовано большое количество колонн гибкостью  $\frac{l_0}{h}$  от 10,5 до 31,6 с малыми эксцентриситетами из бетонов класса прочности на сжатие от В15 до В45 и процентами армирования от 0,08 до 1,67 %. Изучены прямоугольные сечения и полые железобетонные трубы. Материалы исследований [14] легли в основу действующих норм РФ по проектированию железобетонных конструкций.

В работе В.В. Гичко [6] с учетом исследований [4, 5] составлен алгоритм «точного» метода расчета железобетонных сжатых стоек, основанный на решении методом последовательных приближений системы нелинейных уравнений. Системы уравнений составляются для поперечного сечения с внешней сжимающей нагрузкой с эксцентриситетом исходя из условия равновесия эпюры деформации искривленного стержня с учетом диаграммы работы бетона и стержневой арматуры с учетом криволинейных диаграмм работы. Представленный метод расчета не использует коэффициентов продольного изгиба и других эмпирических коэффициентов, учитывающих неравномерное распределение напряжений по сечению. Поэтому, вероятно, диапазон сходимости расчета автора [6] с собственными экспериментами и результатами исследований других авторов [4, 5] составляет от -23...31 % (запас в расчете отсутствует) до 51 % (коэффициент использования 1,51). Очевидно, что полный отказ от эмпирических данных и коэффициентов невозможен для конструкций из бетона, которым свойственно не только образование микро- и макротрещин на самом ран-

нем этапе нагружения, но и явление ползучести, в том числе при приложении кратковременно действующих нагрузок [15, 16, 17].

Одной из последних работ по рассматриваемой теме стали исследования 2014–2015 гг., выполненные сотрудниками ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Были проведены исследования работы моделей относительно коротких колонн из бетонов с классом прочности на сжатие от В40 до В100 на центральное и внецентренное сжатие с гибкостью  $\frac{l_0}{h}$  около 5,5 для конструкций высотных зданий. Жесткое армирование было выполнено из сварного двутавра, а процент армирования варьировался от 10,3 до 17,6 %. Результаты испытаний и расчетов моделей колонн представлены в работе [15], а также в других.

В нормативных документах по расчету сталежелезобетонных конструкций (СП 266.1325800.2016 Конструкции сталежелезобетонные, EN 1994-1-1 (2004) (English): Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures) расчетные методы для учета эффектов продольного изгиба в сжатых конструкциях основываются на общепринятых в теории железобетона допущениях и гипотезах. Главные из них: допущение о совместной работе бетонной и стальной частей поперечного сечения и гипотеза плоских сечений, которые позволяют достаточно просто выполнять расчеты прочности, основываясь на уравнениях равновесия. В СП 266.1325800.2016 (форм. 7.4) значения коэффициента продольного изгиба  $\varphi$  на внецентренное сжатие приняты на основе норм по проектированию железобетонных конструкций (СП 63.13330.2018, разд. 8). Так было сделано ввиду отсутствия результатов систематизированных однотипных испытаний конструкций на устойчивость с различными процентами армирования и гибкостями из современных бетонов. Кроме того, в процессе проектирования ряда ответственных сооружений с использованием конечно-элементных программных комплексов, которые позволяют моделировать нелинейную работу материалов, были выявлены конструкции, в которых устойчивость гибких колонн теряется при нагрузках на 15–20 % меньших, чем установлены действующими нормами. Подробный анализ моделирования и сопоставления с нормативными значениями несущей способности стоек различных гибкостей приведен в разделе «Результаты».

Целью настоящего исследования является верификация существующих коэффициентов продольного изгиба  $\varphi$  при кратковременном действии нагрузки и экспериментальная их проверка или создание новой системы коэффициентов продольного изгиба, величины которых характерны для конструкций с жестким армированием и современных бетонов (в том числе высокопрочных).

### Методы

Для верификации величин коэффициента продольного изгиба испытаны модели сталежелезобетонных стоек в интервале гибкостей  $\frac{l_0}{h}$  от 6 до 20. Общий вид моделей приведен на рис. 1. Расчетная номинальная длина моделей: М1.1 – 3200 мм, М1.2 – 2400 мм, М1.3 – 1600 мм, М1.4 – 960 мм; поперечное номинальное сечение по опалубке размером 160×160 мм. Жесткая арматура выполнена в виде двутавра, образованного из двух швеллеров высотой 100 мм

по ГОСТ 8240–97 из стали С345. Класс бетона по прочности на сжатие – В100. Продольная арматура принята диаметром 8 мм класса А500С и приварена к опорным стальным пластинам модели, хомуты выполнены из арматуры класса А500С диаметром 6 мм и установлены с шагом 100 мм. Общий вид жесткой арматуры колонн показан на рис. 2. Суммарный процент армирования поперечного сечения для всех моделей составляет 10,3 %.

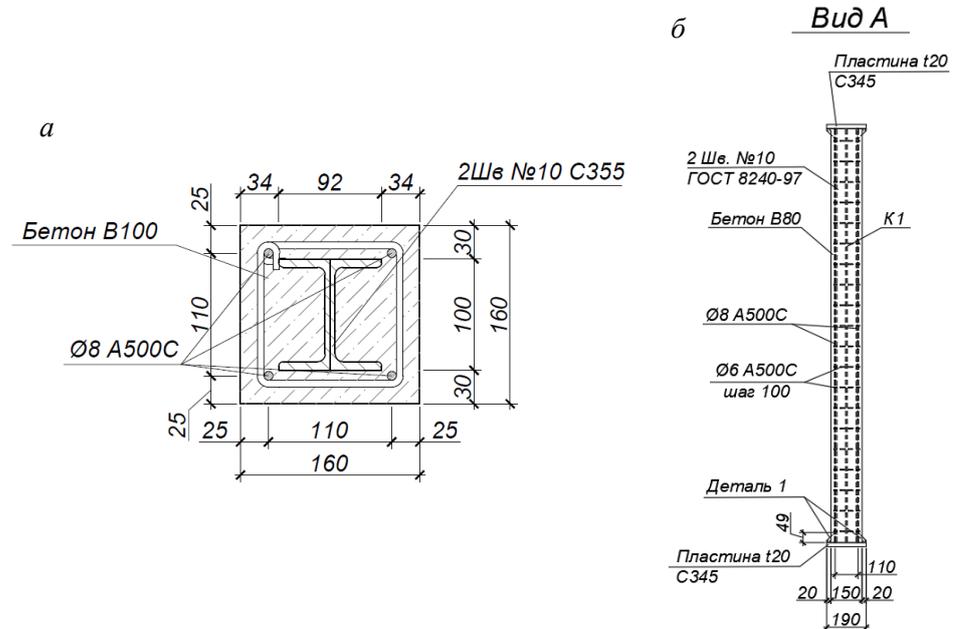


Рис. 1. Схема испытанных моделей:

*a* – поперечное сечение; *б* – вид сбоку

Fig. 1. Schematic of tested models:

*a* – cross-section; *b* – side view

Для фиксации деформаций стали и бетона в наиболее нагруженном сечении (по центру высоты стойки) установлена группа тензорезисторов. На полках и стенках двутавра наклеены фольговые тензорезисторы серии FLA (FLAB) Токуо Sokki Kenkyujo с базой 5 (10) мм, номинальным омическим сопротивлением 120 Ом и тензочувствительностью 2,10...2,20. Датчики после наклеивания герметизировались от попадания влаги эпоксидной смолой. После бетонирования на предварительно зашлифованную поверхность бетона были наклеены фольговые тензорезисторы серии PL (PFL) Токуо Sokki Kenkyujo с базой 60 (120) мм, номинальным омическим сопротивлением 120 Ом и коэффициентом тензочувствительности 2,08...2,12. Как показали ранее проведенные автором испытания, база 60 мм и более позволяет регистрировать деформации на поверхности бетона даже в процессе активного трещинообразования практически до момента разрушения бетона. До начала испытаний каждой серии моделей проводились испытания контрольных бетонных образцов-кубов в соответствии с требованиями ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения проч-

ности по контрольным образцам». Испытание самих экспериментальных моделей проводилось в соответствии с требованиями ГОСТ 8829–2018 «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости». Кроме того, для контроля физико-механических характеристик стали жесткого армирования и стержневой арматуры выполнены испытания пропорциональных цилиндрических образцов по ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение». Испытания моделей выполнены на тарированном прессе MAN500 (рис. 3), моделирующем осевую нагрузку до 500 тс (5 МН), на испытательной базе ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко (институт АО «НИЦ «Строительство»). Нагружение производилось поэтапно ступенями не более 10 % от контрольной нагрузки по прочности. На каждой ступени осуществлялась выдержка модели.

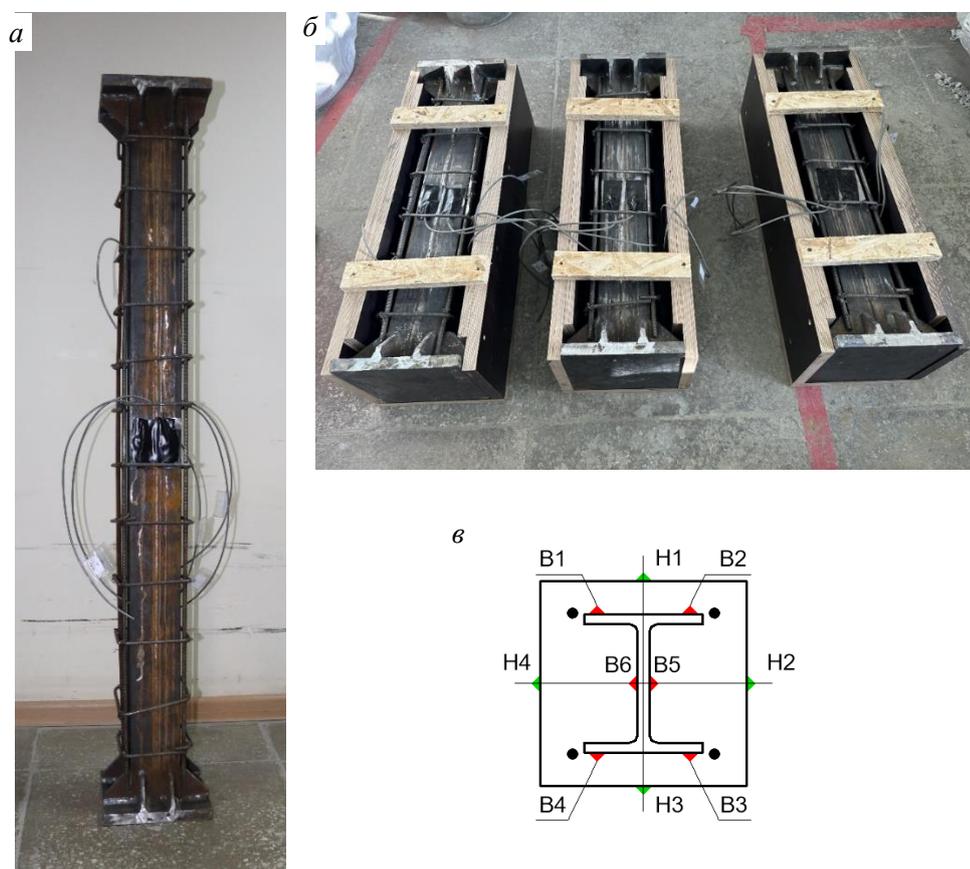


Рис. 2. Элементы жесткого армирования:

*a* – жесткое армирование М1.3; *б* – модели М1.4, уложенные в опалубку перед бетонированием; *в* – схема установки тензодатчиков на стали (красный) и железобетоне (зеленый)

Fig. 2. Elements of rigid reinforcement:

*a* – rigid reinforcement М1.3; *b* – models М1.4 placed in the formwork before concreting; *c* – installation of tensiometers on steel (red) and reinforced concrete (green)

Все модели испытывались на внецентренное сжатие (рис. 4) с эксцентриситетом 5 мм, что близко по значению к случайному эксцентриситету ( $\frac{h}{30} = 5,3$  мм).

Перед нагружением модели производилась выверка нагрузочных приспособлений относительно заранее нанесенных разметочных рисок на поверхности колонн. В процессе испытаний на каждом шаге фиксировались: относительные деформации на тензорезисторах при помощи тензоизмерительной станции, вертикальные абсолютные перемещения, значение сжимающей нагрузки в начале и конце времени выдержки.



Рис. 3. Общий вид испытательной установки с моделью типа M1.4

Fig. 3. General view of test facility with the M1.4 type model

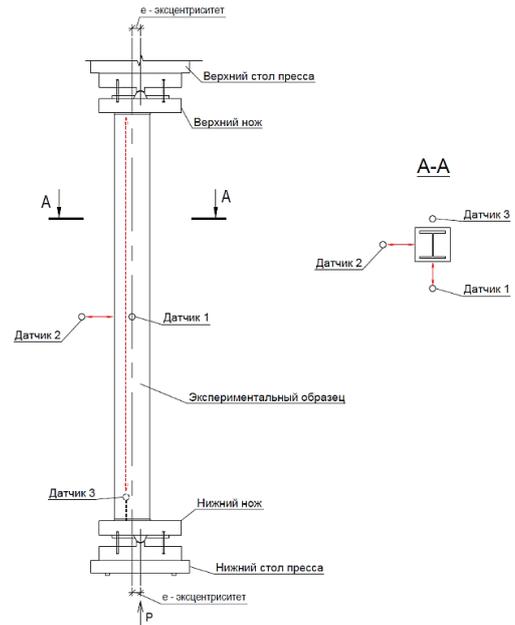


Рис. 4. Схема установки датчиков прогиба и продольной деформации

Fig. 4. Schematic arrangement of deflection and longitudinal strain gauge

Сжатые стойки с жесткой арматурой под нагрузкой также изучены при помощи конечно-элементного численного моделирования в ПК АТЕНА с учетом нелинейной работы материалов: трехлинейной диаграммы для бетона и двухлинейной – для стали. Созданы модели, полностью повторяющие испытанные конструкции по геометрии, граничным условиям, эксцентриситетам и материалам. Размеры сетки конечных элементов и параметры ступенчатого нагружения заданы на основе решения тестовых задач. Средний размер конечного элемента составлял 20 мм, в необходимых местах было выполнено сгущение сетки. Количество шагов для каждой модели также подобрано индивидуально и составляло не менее 20. Для описания работы бетона использована модель материала Fracture-Plastic Constitutive Model (CC3DCementitious2). Модель основана на комбинации модели разрушения при растяжении (Rankine-Fracturing Model)

с моделью разрушения при сжатии материала (Menétrey-Willam). Расчеты всех конструкций выполнены с учетом образования и раскрытия трещин в бетоне. Примеры моделей конструкций приведены на рис. 5.

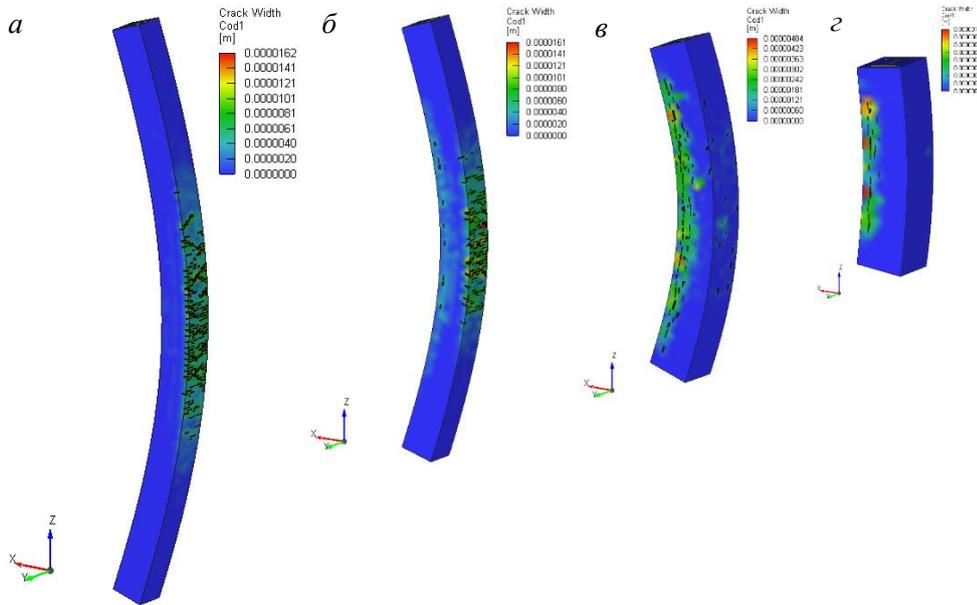


Рис. 5. Деформированные схемы КЭ-моделей с трещинами в бетоне:

*a* – M1.1; *б* – M1.2; *в* – M1.3; *г* – M1.4

Fig. 5. FE models of concrete deformation with cracking:

*a* – M1.1; *b* – M1.2; *c* – M1.3; *d* – M1.4

## Результаты

По результатам испытаний получены деформации выгиба моделей ( $f_{\max}$ ), укорочения ( $dL_{\max}$ ), распределения напряжений по показаниям тензодатчиков ( $\sigma_{st}$  – на стали и  $\sigma_b$  – на бетоне), предельная разрушающая нагрузка  $N_u$ . Основные результаты испытаний приведены в табл. 1. Среднее значение предела текучести конструкционной стали и арматуры по результатам испытаний отобранных образцов – 409 и 530 МПа соответственно; прочность бетона на сжатие для каждой партии испытаний приведена в табл. 1, графа 5. В табл. 1 также приведена вычисленная предельная прочность поперечного сечения с учетом фактических материалов  $N_{calc}$  (графа 6), определенная как сумма несущей способности поперечного сечения каждого элемента поперечного сечения (бетона, жесткой и стержневой арматуры).

На рис. 6 приведены данные измерений напряжений на стальных элементах жесткого армирования ( $\sigma_{st}$ ) и на бетоне ( $\sigma_b$ ) в виде эпюр нормальных напряжений для некоторых испытанных колонн в поперечном сечении в плоскости полка двутавра по ступеням нагрузки для каждой группы моделей (т. е. в направлении приложения моментной нагрузки в виде эксцентриситета).

Таблица 1

## Результаты испытаний

Table 1

## Test results

Мо- дель	$l_0$ , см	$h$ , см	$\frac{l_0}{h}$	$R_b$ , МПа	$N_{calc}$ , кН	$N_u$ , кН	$\sigma_{st}$ , МПа ( $N/N_u$ )	$\sigma_b$ , МПа ( $N/N_u$ )	$f_{max}$ , мм ( $N/N_u$ )	$dL_{max}$ , мм ( $N/N_u$ )
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
M1.1.1	315,2	16,0	19,7	96,21	3232	2207	193 (0,93)	74 (0,93)	7,5 (0,93)	5,3 (0,93)
M1.1.2	315,2	16,0	19,7	96,21	3232	1766	162 (1,00)	96 (1,00)	1,8 (0,42)	3,0 (0,42)
M1.2.1	243,0	16,2	15,0	94,77	3199	2796	270 (1,00)	96 (1,00)	2,0 (0,74)	4,9 (0,63)
M1.2.2	242,3	16,2	15,0	94,77	3199	2551	234 (1,00)	96 (1,00)	4,7 (0,81)	4,8 (0,81)
M1.2.3	243,9	16,3	15,0	94,77	3199	2354	208 (1,00)	72 (1,00)	2,75 (0,94)	4,9 (0,88)
M1.3.1	161,8	16,2	10,0	95,58	3218	2502	304 (1,00)	87 (1,00)	1,1 (0,82)	4,23 (0,76)
M1.3.2	161,4	16,1	10,0	95,58	3218	2649	355 (1,00)	96 (1,00)	3,0 (0,94)	3,6 (0,83)
M1.3.3	162,0	16,2	10,0	95,58	3218	3090	315 (1,00)	96 (1,00)	1,2 (0,71)	4,7 (0,48)
M1.4.1	96,6	16,1	6,0	96,75	3245	2619	295 (1,00)	84 (1,00)	0,15 (0,67)	2,5 (0,79)
M1.4.2	96,5	16,1	6,0	96,75	3245	3090	305 (1,00)	96 (1,00)	0,12 (0,70)	2,4 (0,70)
M1.4.3	96,7	16,1	6,0	96,75	3245	2649	258 (0,89)	90 (0,89)	0,79 (0,89)	2,3 (0,89)

На основании анализа эпюр можно оценить эксцентриситет в среднем сечении по длине колонны путем определения центра тяжести эпюр нормальных напряжений стали и бетона. Данный эксцентриситет обозначим  $e_{st,b}$ . В соответствии с нормами проектирования и основными теоретическими предпосылками расчета стержней на устойчивость по деформированной схеме (с учетом дополнительного эксцентриситета от возрастающего прогиба) эксцентриситет на этапе приложения нагрузки  $N$  вычисляется по формуле

$$e_{st,b} = e_0 \eta, \quad (1)$$

где  $e_{st,b} = e_0 \eta$ ; коэффициент  $\eta = \frac{1}{1 - N/N_{cr}}$ , где  $N_{cr}$  – критическая сила по Эйлеру.

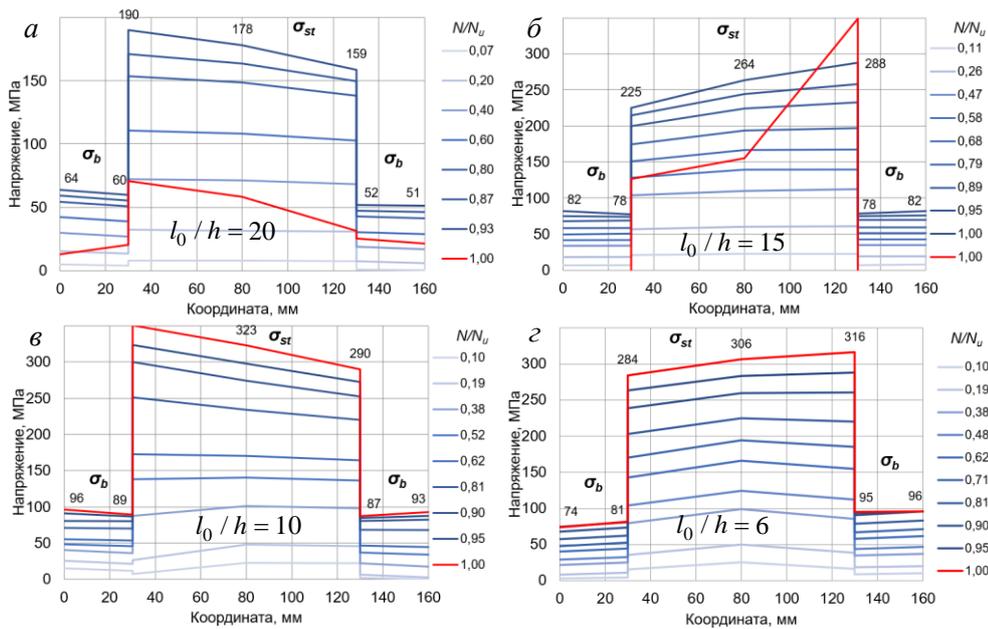


Рис. 6. Нормальные напряжения в плоскости полок двутавра:

*a* – M1.1.1; *б* – M1.2.1; *в* – M1.3.3; *г* – M1.4.2

Fig. 6. Normal stresses in I-beam plane:

*a* – M1.1.1; *b* – M1.2.1; *c* – M1.3.3; *d* – M1.4.2

Исходя из полученных по результатам тензометрии данных, рассмотрим графики эксцентриситетов  $e_{st,b}$  для испытанных стоек и сопоставим их с графиками соответствующего теоретического (ожидаемого) эксцентриситета  $e_0\eta$  (рис. 7).

На графиках видно, что для всех сжатых стержней имеется начальный участок диаграмм эксцентриситетов от 0,2 до  $0,4 \frac{N}{N_u}$ , где эксцентриситеты пре-

вышают теоретический. Данное обстоятельство соответствует условиям испытаний, при которых на начальных этапах происходит обжатие конструкции, опорных частей, шарниров. Поскольку напряжения в стали и бетоне на этапах нагружения до  $0,4 \frac{N}{N_u}$  являются весьма малыми (см. рис. 6) и условно упругими

(не более 30 МПа – в бетоне и 80 МПа – в стали), «повышенное» фактическое значение эксцентриситета не влияет на дальнейшие результаты испытаний. На последующих этапах нагружения эксцентриситет изменяется в пределах ожидаемых значений (лежит ниже), показанных на рис. 7 пунктирными линиями. В гибких колоннах (M1.1, где  $l_0/h = 19,7$ ) эксцентриситет при нагружении от  $0,7 \frac{N}{N_u}$  до разрушения начинает фактически плавно расти параллельно линии

ожидаемого эксцентриситета, т. е. только в довольно гибких сталежелезобетонных элементах отмечается эффект влияния деформированной схемы и рост эксцентриситета за счет нарастающей деформации выгиба стержня.

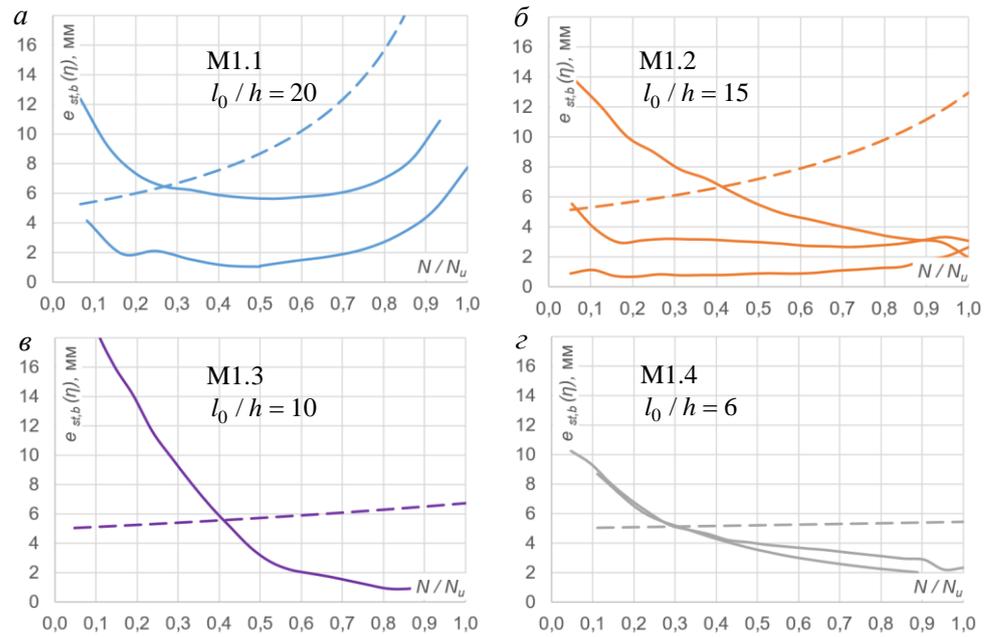


Рис. 7. Эксцентриситеты фактические (сплошные линии) и теоретические (пунктир) для соответствующих групп моделей:

$a$  – M1.1;  $б$  – M1.2;  $в$  – M1.3;  $г$  – M1.4

Fig. 7. Real (solid lines) and theoretical (dashed lines) eccentricities for different models:

$a$  – M1.1;  $b$  – M1.2;  $c$  – M1.3;  $d$  – M1.4

На рис. 8 приведены данные измерений деформаций испытанных стержней: относительного прогиба  $\frac{f}{L_0}$  и относительного укорочения  $\frac{dL}{L_0}$ . Ввиду того, что в каждой группе моделей были идентичные экземпляры колонн, отличающиеся незначительно по геометрическим параметрам поперечных сечений, внутри каждой группы данные по прогибам были осреднены на каждой ступени нагрузки. На графиках они представлены в виде дискретных значений. Сплошными линиями показаны соответствующие кривые для групп моделей, полученные конечно-элементным моделированием.

Анализируя представленные на рис. 8 данные, можно заключить, что численные конечно-элементные модели достаточно точно описывают работу реальных испытанных стержней даже при относительно упрощенном моделировании работы стали и бетона (двух- и трехлинейной диаграммы соответственно). Дискретные значения, полученные по результатам испытаний, повторяют очертания графиков КЭ-моделей, что говорит о правильном подходе, принятом при моделировании сжато-изогнутых стержней. Имеющиеся разбросы обусловлены фактически отличными от нормативных и принятых в КЭ-моделях модулей деформации бетона, другими случайными факторами. Для деформаций укорочения при нагрузках от 0 до  $0,8 \frac{N}{N_u}$  для всех исследованных гибкостей отмечены практически линейные графики, что позволяет с достаточ-

ной надежностью оценивать укорочение конструкций по простым соотношениям осевой жесткости. Представленные выше данные по анализу напряжений, деформаций конструкций и сравнение их с данными компьютерного моделирования показывают достаточно хорошую сходимость результатов в целом. В связи с этим считаем возможным дальнейшие обобщения для других бетонов и видов жесткого армирования выполнять с учетом материалов, полученных в ходе настоящего исследования.

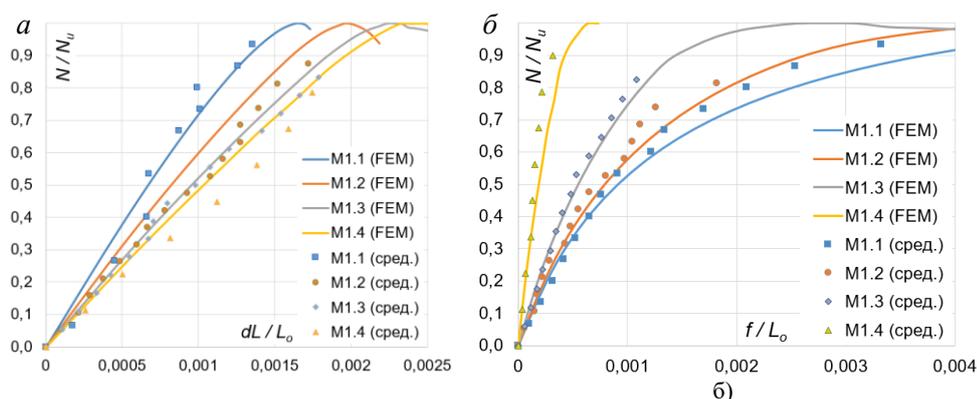


Рис. 8. Деформации испытанных и КЭ-моделей:

$a$  – относительное укорочение;  $b$  – относительный прогиб

Fig. 8. Deformation of tested and FE models:

$a$  – compressive deformation;  $b$  – relative deflection

В табл. 2 приведены обобщенные результаты эксперимента и КЭ-моделирования исследованных конструкций. Представлены нормативные значения коэффициента  $\varphi_{СП}$  (графа 4) для соответствующих гибкостей, несущая способность стержней по нормам с учетом этого коэффициента, определяемая перемножением  $N_{calc} \varphi_{СП}$  (графа 5); приведены частные и средние значения коэффициента  $\varphi_{test} = \frac{N_u}{N_{calc}}$  (графа 8); даны предельные значения сжимающих сил по результатам КЭ-моделирования (графа 10). На рис. 9 приведены сравнительные диаграммы по результатам испытаний и расчетов.

При сравнении значений несущей способности, вычисленных при помощи нормативного коэффициента  $\varphi_{СП}$ , получаются достаточно большие разбросы по сравнению с данными экспериментов (графа 14) и конечно-элементного моделирования. Разница составляет от  $-5$  до  $-38$  % при максимальной гибкости  $l_0/h \approx 20$ , т. е. определение несущей способности с использованием коэффициента  $\varphi_{СП}$  не дает запаса и завышает предельную несущую способность стержней. При этом результаты выполненных численных расчетов и экспериментов согласуются между собой достаточно хорошо (графа 15); разница от  $6,5$  % до  $-2,5$  %. Кривая коэффициента  $\varphi_{СП}$ , построенная по текущим нормам (СП 63.13330 и СП 266.1325800), не отражает действительной работы стоек на

всем диапазоне гибкостей и при расчете устойчивости при кратковременном действии нагрузок не дает запаса, напротив, приводит к завышенным значениям коэффициента  $\varphi$ . Видно, что график нормативного коэффициента  $\varphi$  (красный пунктир) противоречит теоретическим предпосылкам расчета гибких стержней на устойчивость и не имеет снижения при повышении гибкости. Нелинейный характер графика  $\varphi - l_0 / h$  подтверждается опытами с железобетонными элементами и исследованиями других авторов (например, [9, 14]), соответствует общим законам сопротивления материалов и строительной механики.

Таблица 2

## Сводные данные расчетов и эксперимента

Table 2

## Calculation and experiment data

Мо- дель	$\frac{l_0}{h}$	$N_{calc}$ , кН	СП 266		Эксперимент <sup>1</sup>				КЭ-расч.		Предло- жение		Сравнение <sup>2</sup>		
			$\varphi$ СП	$N_{calc}\varphi$ СП, кН	$N_{it}$ , кН	$N_{u,av}$ , кН	$\varphi_{test} = N_{it}/N_{calc}$	$\varphi_{av,test}$	$N_{FEM}$ , кН	$\varphi_{FEM} = N_{FEM}/N_{calc}$	$\varphi_{prop}$	$N_{calc}\varphi_{prop}$ , кН	$\Delta(5/7)$ , %	$\Delta(10/7)$ , %	$\Delta(13/7)$ , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
M1.1	19,7	3232	0,85	2747	2207	1986	0,68	0,62	1943	0,60	0,61	1972	-38	2,2	0,7
	19,7	3232			1765		0,55								
M1.2	15	3198	0,88	2814	2795	2566	0,87	0,80	2400	0,75	0,78	2494	-10	6,5	2,8
	15	3198			2550		0,80								
	15	3198			2354		0,74								
M1.3	10	3217	0,9	2895	2501	2746	0,78	0,85	2725	0,85	0,85	2734	-5	0,8	0,4
	10	3217			2648		0,82								
	10	3217			3090		0,96								
M1.4	6	3244	0,92	2984	2619	2786	0,81	0,86	2855	0,88	0,86	2790	-7	-2,5	-0,1
	6	3244			3090		0,95								
	6	3244			2648		0,82								

Примечания:

1. Средние значения величин в графах 7 и 9 вычислены как среднее арифметическое значение в графах 6 и 9 соответственно.

2. Сравнение величин выполнено по формуле  $\Delta = \left(1 - \frac{\text{Номер столбца } n}{\text{Номер столбца } m}\right) 100\%$ . Обозначение  $\Delta(5/7)$  означает номера сравниваемых столбцов  $n$  и  $m$ .

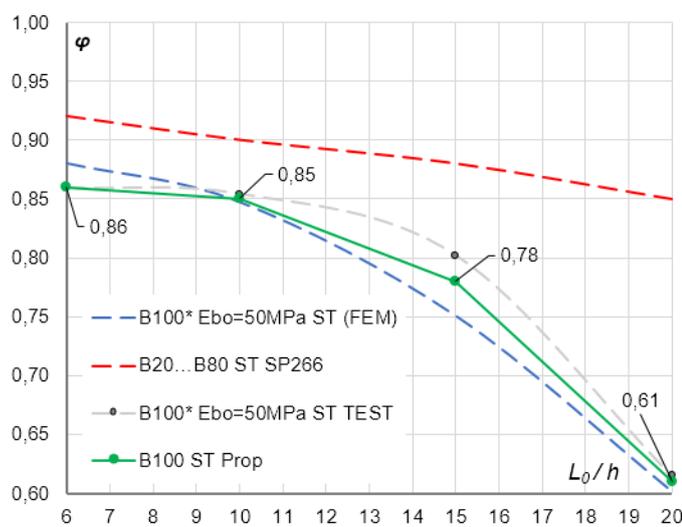


Рис. 9. Коэффициенты продольного изгиба  $\phi$   
 Fig. 9. Longitudinal bending coefficient  $\phi$

Для устранения выявленных противоречий предложена новая кривая для бетонов В100, которая приведена на рис. 9 (зеленая линия) и в табл. 2 (графа 12). Данная кривая объемлет результаты испытаний (серый пунктир) и численных расчетов (синий пунктир). Сравнение фактической несущей способности по эксперименту и вычисленной по предлагаемым величинам коэффициента  $\phi_{prop}$  показывает, что разница между ними составляет от  $-0,1\%$  до  $2,8\%$  (графа 16). Это является удовлетворительной разницей для расчетов инженерной точности.

### Заключение

По итогам исследования можно сделать следующие выводы:

1 Выполнены экспериментально-теоретические исследования с численным моделированием стержней различной гибкости для подтверждения нормативных закономерностей для коэффициента продольного изгиба при кратковременном действии нагрузки  $\phi$ .

2. Анализ экспериментальных, расчетных и нормативных данных показал, что значение коэффициента  $\phi$  при кратковременном действии нагрузки в СП 266.1325800 существенно завышено как по сравнению с экспериментальными данными, так и с результатами численных расчетов. Разница с экспериментальными данными составляет от  $5,4\%$  для  $l_0/h = 10$  до  $38\%$  при  $l_0/h = 20$ , что говорит о необходимости корректировки нормативных значений коэффициента. Кривая коэффициента  $\phi$  должна иметь явный нелинейный характер и учитывать различные значения модулей деформации бетона.

3. По результатам анализа экспериментальных данных и численных расчетов по напряжениям, деформациям, образованию трещин установлена их удовлетворительная сходимость. Это позволяет в дальнейшем моделировать

стержни из различных бетонов и разными конструкциями жесткой арматуры. По выгибу и укорочению стержней в целом достаточно точные результаты численного моделирования получаются при задании трехлинейной диаграммы работы бетона и двухлинейной – стали.

4. По результатам анализа экспериментальных исследований подтверждаются значения случайных эксцентриситетов на уровне  $b/30$  (где  $b$  – характерный размер железобетонной части поперечного сечения), применяемых при расчете сжатых конструкций. Для сталежелезобетонных конструкций данный эксцентриситет обусловлен взаимно эксцентричным расположением железобетонной и стальной частей сечения.

5. По результатам анализа и обобщения экспериментальных, численных и теоретических расчетов предложены новые коэффициенты продольного изгиба  $\varphi$ , которые рекомендуется использовать при расчетах сталежелезобетонных элементов на сжатие. С учетом выявленных противоречий в величинах коэффициента  $\varphi$  необходимо изучить и скорректировать его значения для других бетонов, кроме изученного В100, и видов жесткой арматуры.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Васильев А.П. Железобетон с жесткой арматурой. Москва : Государственное изд-во строительной литературы, 1941. 123 с.
2. Житницкая Э.Л. Исследование внецентренно сжатых железобетонных колонн с несущей профильной арматурой при малых эксцентриситетах : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1958. 350 с.
3. Егоров Н.А. Исследование прочности и деформативности железобетонных колонн с жесткой арматурой из низколегированных сталей : специальность 05.23.01 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1975. 142 с.
4. Каюмов Р.Х. Устойчивость гибких железобетонных стержней из высокопрочных бетонов : специальность 05.23.01 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Киев, 1972. 201 с.
5. Бамбура А.Н. Исследование кратковременной устойчивости сжатых железобетонных элементов при нешарнирном закреплении на концах : специальность 05.23.01 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Киев, 1978. 199 с.
6. Гичко В.В. Расчет устойчивости гибких железобетонных стоек по деформационному методу : специальность 05.23.01 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Киев, 2015. 137 с.
7. Ханджи В.В. Расчет многоэтажных зданий со связевым каркасом. Москва : Стройиздат, 1977. 189 с.
8. Руководство по проектированию железобетонных конструкций с жесткой арматурой. Москва : Стройиздат, 1978. 55 с.
9. Беглов А.Д., Санжаровский Р.С. Теория расчета железобетонных конструкций на прочность и устойчивость. Современные нормы и Евростандарты. Санкт-Петербург ; Москва : Изд-во АСВ, 2006. 221 с.
10. Санжаровский Р.С. К теории устойчивости сжатых стержней, в частности трубобетонных, при статическом и динамическом нагружении с учетом ползучести // Механика стержневых систем и сплошных сред. Труды ЛИСИ. 1970. № 63. С. 216–243.
11. Санжаровский Р.С. Исследования устойчивости сжато-изогнутых стержней в условиях нелинейной ползучести материала // Исследования по расчету и проектированию сооружений. Ленинград : ЛИСИ, 1975. С. 164–171.
12. Санжаровский Р.С. К вопросу расчета устойчивости сжато-изогнутых элементов с использованием приближенного выражения для кривизны // Исследования по строительным конструкциям и испытанию сооружений. Ленинград : ЛИСИ, 1968. С. 23–27.

13. Санжаровский П.С. Железобетон: актуализированный норматив // Строительная газета. 2015. № 21.
14. Чистяков Е.А. Основы теории, методы расчета и экспериментальные исследования несущей способности сжатых железобетонных элементов при статическом нагружении : специальность 05.23.01 : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 1988. 498 с.
15. Травуш В.И., Конин Д.В., Рожкова Л.С., Крылов А.С. и др. Экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций, работающих на внецентренное сжатие // Academia. Архитектура и строительство. 2016. № 3. С. 127–135. EDN: WWOVFVZ
16. Арленинов П.Д. Деформирование и устойчивость сжатых и внецентренно сжатых стержневых железобетонных элементов с учетом ползучести и трещинообразования : специальность 05.23.01 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Арленинов Петр Дмитриевич. Москва, 2016. 24 с.
17. Крылов С.Б., Арленинов П.Д. Критическая сила для железобетонных стержневых элементов // Academia. Архитектура и строительство. 2012. № 2. С. 136–138. EDN: PYDVFV

## REFERENCES

1. Vasiliev A.P. Rigid Steel Reinforced Concrete. Moscow, 1941. 123 p. (In Russian)
2. Zhitnitskaya E.L. Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Columns with Load-Bearing Reinforcement. PhD Thesis. Moscow, 1957 (In Russian)
3. Egorov N.A. Strength and Deformability of Rigid Reinforced Concrete Columns Made of Low-Alloy Steel. PhD Thesis. Moscow, 1975. 142 p. (In Russian)
4. Kajumov R.H. Stability of Flexible Reinforced Concrete Rods Made of High-Strength Concrete. PhD Thesis. Kiev, 1972. 201 p. (In Russian)
5. Bambura A.N. Short-Term Stability of Compressed Reinforced Concrete Elements with Non-Hinged Fastening at Ends. PhD Thesis. Kiev, 1978. 199 p. (In Russian)
6. Gichko V.V. Stability Analysis of Flexible Reinforced Concrete Struts using the Deformation Method. PhD Thesis. Kiev, 2015. 137 p. (In Russian)
7. Handzhi V.V. Calculation of Multi-Storey Buildings with Connection Frame. Moscow: Stroizdat, 1977. 189 p. (In Russian)
8. Guidelines for Reinforced Concrete Structure Design with Rigid Reinforcement. Moscow: Stroizdat, 1978. 55 p. (In Russian)
9. Beglov A.D., Sanzharovsky R.S. Strength and Stability Analysis of Reinforced Concrete Structures. Modern European Standards. Saint-Petersburg – Moscow: ACB, 2006. 221 p. (In Russian)
10. Sanzharovsky R.S. On the Theory of Stability of Compressed Concrete Pipe Rods under Static and Dynamic Loads at Creep. *Mekhanika sterzhnevyykh sistem i sploshnykh sred. Trudy LISI*. 1970; 63: 216–243. (In Russian)
11. Sanzharovsky R.S. Stability of Compressed Curved Rods at Nonlinear Material Creep. In: Calculation and Design of Structures. Leningrad, 1975. Pp. 164–171. (In Russian)
12. Sanzharovsky R.S. Toward Stability Analysis of Compressed Curved Elements Using Approximate Curvature Expression. In: Research in Structure Building and Testing. Leningrad, 1968. Pp. 23–27. (In Russian)
13. Sanzharovsky R.S. Reinforced Concrete: Updated Standard. *Stroitel'naya gazeta*. Moscow, 2015; No. 21. (In Russian)
14. Chistjakov E.A. Theoretical Fundamentals, Calculation Methods and Experimental Studies of Bearing Capacity of Compressed Reinforced Concrete Elements under Static Loading. DSc Thesis. Moscow, 1988. 498 p. (In Russian)
15. Travush V.I., Konin D.V., Rozhkova L.S., Krylov A.S. Composite Structures at Eccentric Compression. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*, 2016; 3: 127–135. EDN: WWOVFVZ (In Russian)
16. Arlenin P.D. Deformation and Stability of Compressed and Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Elements at Creep and Cracking. PhD Thesis. Moscow, 2016. 143 p. (In Russian)
17. Krylov S.B., Arlenin P.D. Critical Force of Reinforced Concrete Core Elements. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2012; 2: 136–138. EDN: PYDVFV (In Russian)

**Сведения об авторе**

*Конин Денис Владимирович*, канд. техн. наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией высотных зданий и сооружений отдела металлических конструкций, Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А. Кучеренко АО «Научно-исследовательский центр (НИЦ) «Строительство», 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., 6, konden@inbox.ru

**Author Details**

*Denis V. Konin*, PhD, Director Deputy for Research, Head of Laboratory, Koucherenko Central Research Institute of Civil Structures, 6, 2nd Institutskaya Str., 109428, Moscow, Russia, konden@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 11.06.2024  
Одобрена после рецензирования 02.10.2024  
Принята к публикации 14.11.2024

Submitted for publication 11.06.2024  
Approved after review 02.10.2024  
Accepted for publication 14.11.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 6. С. 99–111.

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 (6): 99–111.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 620.179.18

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-99-111

EDN: GWCKRL

### АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ АРМИРОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ БЕТОНА

**Борис Александрович Люкшин, Григорий Евгеньевич Уцын**

*Томский государственный университет*

*систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия*

**Аннотация.** *Актуальность.* Разработка новых методов неразрушающего контроля особенно актуальна для таких строительных материалов, как бетон, в связи с широким его применением. Выполнен анализ результатов экспериментальных данных, полученных на основе механоэлектрических явлений в изделии из материала, содержащего пьезоэлектрические включения, и результатов математического моделирования волнового процесса в этом же изделии.

*Метод* основан на явлении механоэлектрических преобразований в пьезосодержащей среде при импульсном механическом воздействии. Расчеты выполнены как с помощью авторской программы, так и с использованием специального пакета программ.

*Результаты.* Рассмотрено два варианта: однородный образец и образец, содержащий дефекты в виде включений. На основе взаимного соответствия экспериментальных и расчетных данных сделан вывод о наличии перспектив у нового метода неразрушающего контроля изделий из материалов с пьезоэлектрическими включениями на основе механоэлектрических явлений.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, моделирование, бетон, численные методы, акустические методы контроля

**Для цитирования:** Люкшин Б.А., Уцын Г.Е. Анализ возможностей метода неразрушающего контроля армированных изделий из бетона // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 99–111. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-99-111. EDN: GWCKRL

## ORIGINAL ARTICLE

### EXPLORATORY STUDY OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF REINFORCED CONCRETE PRODUCTS

**Boris A. Lyukshin, Grigory E. Utsyn**

*Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia*

**Abstract.** The paper presents the experimental data based on dynamoelectric phenomena in a product made of a material containing piezoelectric inclusions and mathematical simulation results of the wave process in this product. Calculations are based on the author's program and

special software package. Two variants are considered: a homogeneous sample and a sample with defect inclusions. Based on the mutual correspondence of experimental and calculated data, it is concluded that there are prospects for a new method of non-destructive testing of products made of materials with piezoelectric inclusions based on dynamoelectric phenomena.

**Keywords:** non-destructive testing, mathematical simulation, concrete, numerical method, acoustic control method

**For citation:** Lyukshin B.A., Utsyn G.E. Exploratory Study of Non-Destructive Testing of Reinforced Concrete Products. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (6): 99–111. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-99-111. EDN: GWCKRL

### Введение

В зависимости от физической природы положенных в основу методов неразрушающего контроля, они подразделяются на девять основных видов: акустический, магнитный, вихретоковый, проникающими веществами, радиоволновый, радиационный, оптический, тепловой и электрический.

С одной стороны, это свидетельствует о широком спектре изделий, которые подвергаются такому контролю, с другой – об отсутствии единственного надежного способа контроля. Например, применительно к бетону ГОСТ 22690–2015 «Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля» устанавливает механические методы определения прочности на сжатие бетонов в конструкциях по упругому отскоку, ударному импульсу, пластической деформации, отрыву, скалыванию ребра и отрыву со скалыванием. Эти методы диагностики состояния бетона, содержащего арматуру, часто требуют громоздкого оборудования и длительного времени обработки результатов [1, 2].

Ниже обсуждается метод, позволяющий повысить, в частности, качество контакта основного материала и арматуры с использованием явления механо-электрических преобразований в пьезоэлектрических материалах при импульсном возбуждении. Перспективность этого метода обсуждается в работе [3]. Точность метода повышается, если использовать результаты математического моделирования процессов, происходящих в изделии под действием импульсной нагрузки. При тестировании метода результаты математического моделирования были сопоставлены с лабораторными исследованиями. Расхождение полученных при моделировании результатов с экспериментальными объясняется тем, что в лабораторных образцах присутствуют мелкая пористость и незначительные дефекты, в то время как математическая модель реализуется для идеальной среды.

### Модель для определения параметров напряженно-деформированного состояния расчетной области

Вычислительный алгоритм, используемый при решении краевой задачи теории упругости для неоднородной расчетной области, основан на применении нецентральной разностной схемы, когда для аппроксимации пространственных производных в схеме типа «предиктор-корректор» поочередно используются левые и правые конечные разности [4, 5, 6, 7, 8].

Система уравнений, которая описывает поведение деформируемого твердого тела под действием импульсной нагрузки с амплитудой, исключаящей не-

упругие эффекты, включает в себя уравнения движения, соотношения Коши, закон Гука и постановку краевых условий. Далее обсуждаются результаты, полученные для плоской постановки задачи. Расчетная область представляет собой прямоугольник ABCD (рис. 1).

Условия жесткого закрепления на нижней границе DC:

$$U_y = 0; \quad U_x = 0,$$

где  $U_y$  и  $U_x$  – перемещения вдоль вертикальной и горизонтальной оси соответственно.

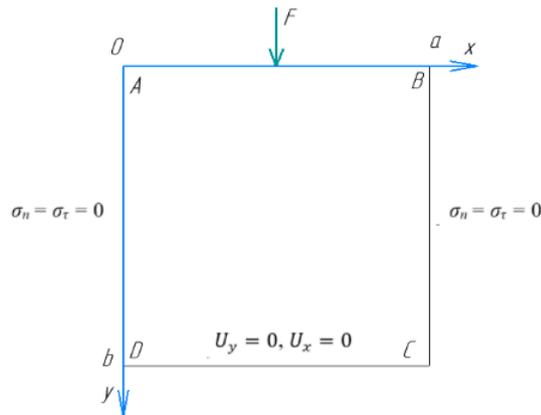


Рис. 1. Расчетная область  
Fig. 1. Computational domain

На боковых свободных границах AD и BC значения нормальной и тангенциальной составляющей напряжения:

$$\sigma_n = \sigma_\tau = 0.$$

На верхней границе AB вдоль нормали к ней приложена нагрузка в виде

$$\sigma_n = T(t)F(x),$$

касательные напряжения пренебрежимо малы:

$$\sigma_\tau = 0.$$

$T(t)$  – функция времени  $t$ , определяющая закон изменения нагрузки во времени;  $F(x)$  – функция, определяющая закон изменения нагрузки по поверхности, в двумерном случае вдоль линии контура:

$$F(x) = A \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2d}\right),$$

где  $x_0$  – координата центра приложенного импульса;  $d$  – расстояние от центра импульса, на котором нормальное напряжение уменьшается в  $e$  раз.

Зависимость  $T(t)$  задавалась в виде половины затухающей по экспоненте синусоиды:

$$T(t) = e^{-\beta t} \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau}\right) \eta(t);$$

$$\eta(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq \tau, \\ 0, & t > \tau, \end{cases}$$

где  $\tau$  – время приложения импульсной нагрузки.

Для оценки корректности полученных результатов проводилось сопоставление с расчетами по программе ANSYS, использующей метод конечных элементов [9, 10].

Результаты показаны в виде изолиний перемещений для последовательных моментов времени (рис. 2, 3).

Время, мкс	Результаты разрабатываемой модели	Результаты ANSYS
5		
10		
15		

Рис. 2. Изолинии продольных смещений, полученные при численном моделировании и в пакете ANSYS (5–15 мкс)

Fig. 2. Isolines of longitudinal displacements obtained by numerical modeling and in the ANSYS package

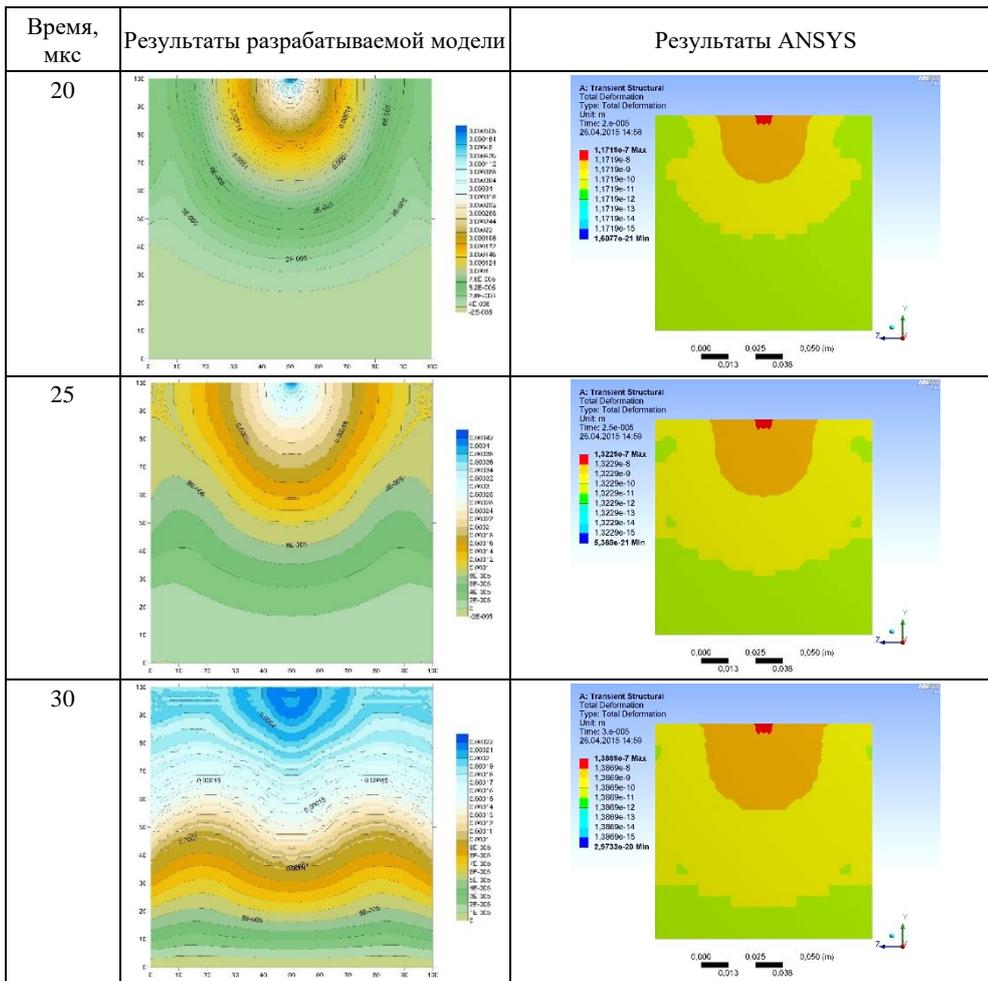


Рис. 3. Изолинии продольных смещений, полученные при численном моделировании и в пакете ANSYS (20–30 мкс)

Fig. 3. Isolines of longitudinal displacements obtained by numerical modeling and in ANSYS finite element program

Приведено сравнение результатов в плоской постановке (авторский пакет) и в осевом сечении расчетной области для трёхмерной постановки (ANSYS). Показано качественное совпадение результатов расчетов в случае моделирования волновых процессов, при этом скорости продольных и поперечных волн в двух- и трехмерных постановках совпадают, что соответствует теоретическому анализу волновых процессов в упругих средах. Корректность представленных результатов подтверждается тем, что фронт волны имеет сферическую форму, хотя расчеты проведены на прямоугольных сетках.

В дальнейшем результаты численного моделирования в плоской постановке используются для расчета электрического отклика.

Это связано с тем, что время расчета существенно различается при решении задач в пространственной и плоской постановке. Более того, в трехмерном

случае при наличии неоднородностей пакет ANSYS автоматически генерирует неравномерную сетку, измельчая ее там, где ожидаются большие градиенты искомых параметров НДС. Такими неоднородностями могут быть трещины или пустоты, галька, щебень, арматура.

При моделировании лабораторного эксперимента расчетная область имеет размеры  $100 \times 100$  мм, что соответствует размерам реального образца. Горизонтальная вставка (арматура) находится на равном удалении от верхней и нижней граней и имеет толщину 10 мм (рис. 4). Задание граничных условий, описанных выше, соответствует лабораторному эксперименту.

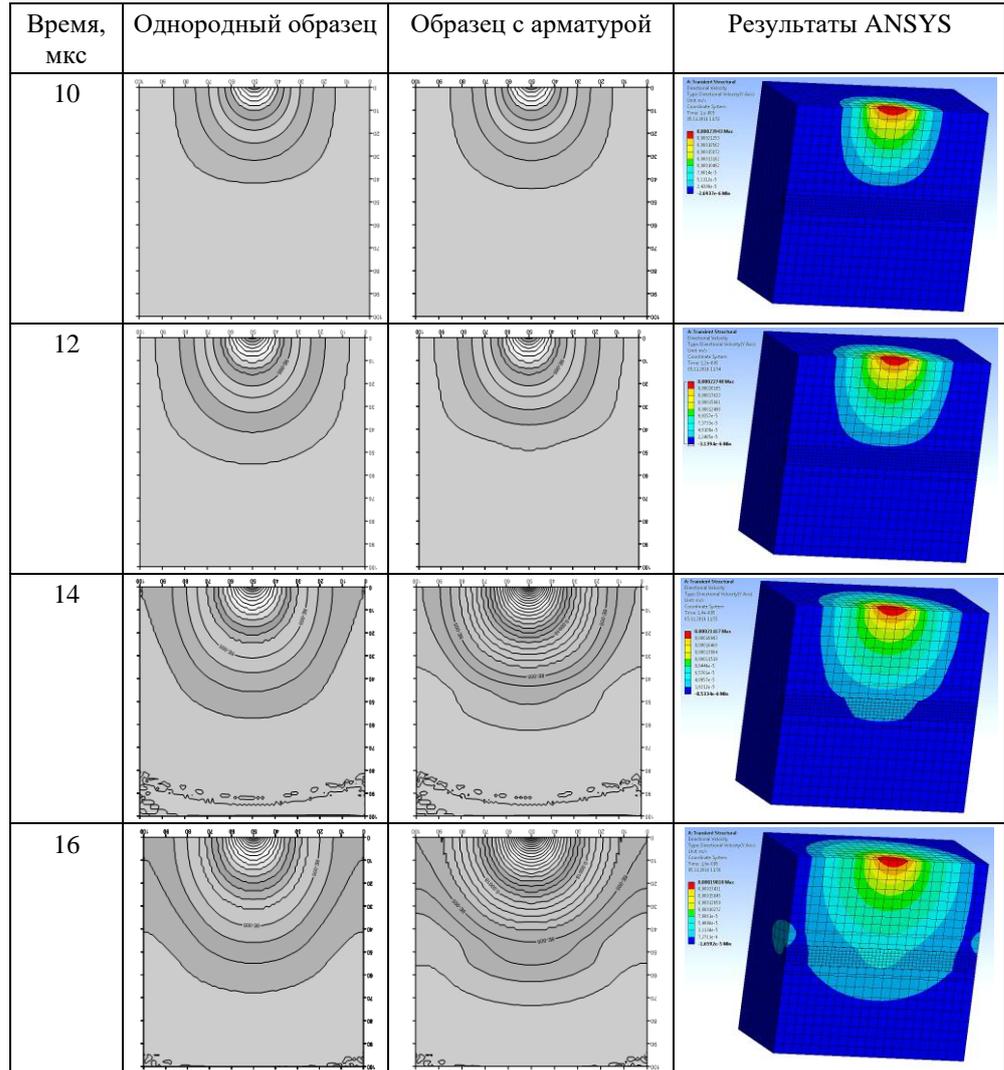


Рис. 4. Изолинии продольных смещений, полученные при численном моделировании для однородной расчетной области и области, содержащей жесткую вставку – арматуру  
Fig. 4. Isolines of longitudinal displacements obtained by numerical modeling for a homogeneous computational domain and area with a rigid reinforcement insert

Наличие вставки меняет как форму фронта волны, он перестает быть сферическим, так и скорость фронта – по вставке с более высокими прочностными свойствами волна движется быстрее.

### Модель механоэлектрических преобразований

Для вычисления электромагнитного отклика используется модель, основанная на классических уравнениях электродинамики [7, 8]. Результаты моделирования волнового процесса применяются при анализе параметров электромагнитного отклика импульсно нагруженных диэлектрических образцов [11, 12].

Напряженность поля диполя, расположенного на расстоянии  $r$  от точки приема, определяется по формуле [13, 14]:

$$E = \frac{3(Pn)n - P}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^3},$$

где  $n$  – единичный вектор в направлении  $r$ ;  $r$  – радиус-вектор от источника-диполя к заданной точке поверхности приемного датчика;  $P$  – электрический момент диполя;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  ф/м – электрическая постоянная;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды.

В результате появления на поверхности приемного электрода свободных носителей заряда, индуцированных электрическим полем, через входное сопротивление измерительной схемы начинает протекать ток (рис. 5).

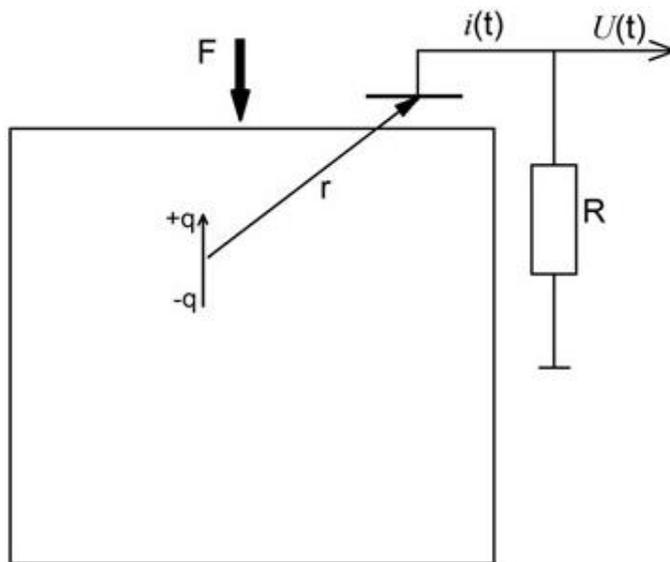


Рис. 5. Схема измерения  
Fig. 5. Schematic of measurement

Электрический приемник представляет собой заземленную через входное сопротивление ( $R$ ) металлическую пластину, расположенную вблизи поверхности исследуемого образца, и находится в зоне действия электрического поля, созданного внутренними источниками.

Напряженность поля диполя в двумерной постановке (рис. 6):

$$E = \frac{P \cos(\varphi)}{2\pi\epsilon_0 r^3},$$

где  $r = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}$  – радиус-вектор, в котором рассматриваемая точка имеет координаты  $x_0, y_0$ , а центр приемного устройства имеет координаты  $x_1, y_1$ .

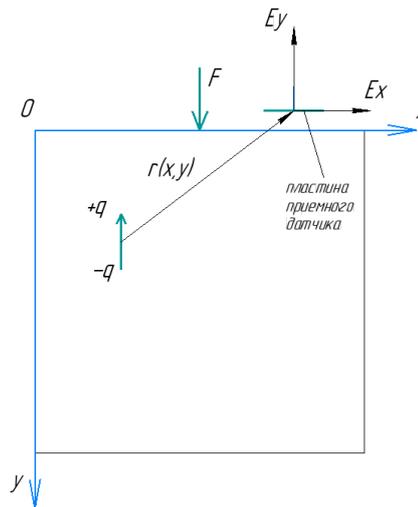


Рис. 6. Компоненты напряженности поля диполя  
Fig. 6. Components of the dipole field strength

В случае если необходимо получить компоненты вдоль соответствующих осей, то в декартовых координатах получим

$$E_r^x = \frac{P_x (\cos(\varphi_x))^2}{2\pi\epsilon_0 r^3}; \quad E_r^y = \frac{P_y (\cos(\varphi_y))^2}{2\pi\epsilon_0 r^3},$$

где

$$\cos(\varphi_x) = \frac{(x_0 - x_1)}{r}; \quad \cos(\varphi_y) = \frac{(y_0 - y_1)}{r}.$$

Модуль вектора напряженности в точке  $|E| = \sqrt{(E_r^x)^2 + (E_r^y)^2}$ .

Компоненты вектора напряженности, сформированные системой зарядов, согласно принципу суперпозиции, для компоненты вдоль оси X:

$$E_r^x = \oint \frac{P_x (\cos(\varphi_x))^2}{2\pi\epsilon_0 r^3} dr$$

или в координатном виде:

$$E_r^x = \oint \frac{P_x (x_0 - x_1)^2}{2\pi\epsilon_0 r^5} dr;$$

$$\frac{\partial |E|}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \oint \frac{P_x (x_0 - x_1)^2}{2\pi\epsilon_0 r^5} dr.$$

С учетом 
$$\frac{\partial q(t)}{\partial t} = \frac{d \cdot S \cdot E_{\text{упр}}}{L} \frac{\partial \Delta L}{\partial t} = \frac{d \cdot S \cdot E_{\text{упр}}}{L} V(t)$$

получим 
$$\frac{\partial |E|}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \oint \frac{dSE_{\text{упр}} V_x (x_0 - x_1)^2}{2\pi\epsilon_0 l_x r^5} dr,$$

где  $(q)$  – заряд, возникающий при деформации пьезоэлемента, определяется через пьезомодуль  $(d)$  и силу  $(F)$  как  $q = d \cdot F$ .

Временная зависимость  $q(t)$  определяется силой, с которой волна при своем движении воздействует на источник в виде пьезовключения. Временная зависимость  $r(t)$  обусловлена деформациями пьезовключения и материала образца в зоне источник – приемник под действием той же силы  $F$ , действующей в объеме образца в соответствии с законом Гука,  $E_{\text{упр}}$  – модуль Юнга,  $L$  – размер модели в направлении возбуждения,  $V(t)$  – скорость смещения по лучу возбуждения,  $l_x$  – толщина пьезоэлемента.

Остальные компоненты записываются аналогично.

$$\frac{\partial |E|}{\partial t} = \sqrt{\left( \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \frac{dSE_{\text{упр}} V_x (x_0 - x_1)^2}{2\pi\epsilon_0 l_x r^5} dx dy \right)^2 + \left( \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \frac{dSE_{\text{упр}} V_y (y_0 - y_1)^2}{2\pi\epsilon_0 l_y r^5} dx dy \right)^2}.$$

Получив таким образом модуль вектора, «придадим» ему направление относительно площадки приема, используя направление нормали:

$$\frac{\partial |E|}{\partial t} = \sum_i \frac{\sigma_{ij}}{|\sigma_{ij}|} \sqrt{\left( \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \frac{P_x (x_0 - x_1)^2}{2\pi\epsilon_0 r^5} dx dy \right)^2 + \left( \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \frac{P_y (y_0 - y_1)^2}{2\pi\epsilon_0 r^5} dx dy \right)^2}.$$

Здесь  $\frac{\sigma_{ij}}{|\sigma_{ij}|}$  определяет знак в зависимости от того, сжимается или растягивается элемент, суммирование производится в каждый момент времени.

Поток вектора напряженности через замкнутую площадку (пластина принимающего устройства):

$$\oint_S \vec{E} \cdot \vec{n} \cdot dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int \rho(\vec{r}) dV.$$

Здесь интегрирование производится по площади принимающего устройства.

На основе параметров волнового процесса рассчитаны электромагнитные отклики (рис. 7, 8). Приведена начальная часть электромагнитного отклика до 75 мкс.

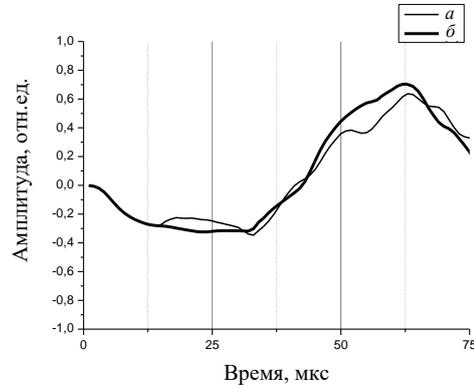


Рис. 7. Результаты численного моделирования для армированного образца:  
*a* – образец с металлической арматурой; *b* – однородный образец  
 Fig. 7. Numerical simulation of reinforced samples:  
*a* – with metal reinforcement; *b* – homogeneous sample

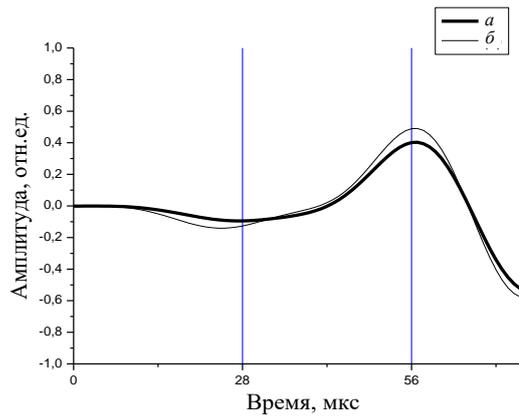


Рис. 8. Измеренный электромагнитный отклик для армированного образца:  
*a* – однородный образец; *b* – образец с металлической арматурой  
 Fig. 8. Electromagnetic response of reinforced samples:  
*a* – homogeneous sample; *b* – with metal reinforcement

Разбивая на равные промежутки времени, равные периоду отражения от противоположных границ, получим растущую разницу в сигналах. Накопление различий позволяет воспользоваться разрабатываемым методом для определения степени дефектности, при наличии в основном массиве дефектов в виде вставок с более высоким модулем упругости и плотностью.

Как видно из приведенных на рис. 7 и 8 зависимостей, наличие вставки (или дефекта) заметно меняет форму электромагнитного отклика как в расчетах, так и в экспериментах. Таким образом, сопоставляя результат теоретиче-

ски полученного электромагнитного отклика для изделия без дефекта и полученного экспериментально, можно судить о наличии или отсутствии неоднородностей в реальном изделии.

### Заключение

Сравнение представленных результатов численного моделирования импульсного нагружения однородных образцов и образцов, содержащих арматуру, с экспериментальными данными показало, что существует корреляция между получаемыми теоретически и экспериментально электромагнитными откликами. Импульсная нагрузка, приложенная к поверхности образца, содержащего пьезовключения, приводит к возникновению электрического поля, которое регистрируется датчиком. Поле сгенерировано суперпозицией сигналов от пьезовключений, распределённых по всему объёму бетонной матрицы.

Результаты, полученные на данном этапе, позволяют отслеживать наличие дефекта по различию расчетного и измеренного электромагнитного отклика на качественном уровне.

Следует заметить, что в отличие от акустических методов разрабатываемый метод не предъявляет особых условий к контакту образец – датчик и является удобным при использовании в полевых условиях. Основным критерием применения метода является наличие пьезоисточников в материале изделия. Дальнейшее развитие метода связано с расширением его использования на различные типы арматуры.

Математическое моделирование позволяет создать банк эталонных электромагнитных откликов, по которым возможен анализ и распознавание дефектов с помощью метода неразрушающего контроля, основанного на эффекте механоэлектрических преобразований.

Можно отметить, что эффект электромагнитного отклика позволяет проводить непрерывный мониторинг строительных конструкций из материалов, содержащих пьезовключения. Установив сеть датчиков по всему объекту и получая данные об уровне сигнала, по резкому изменению уровня можно судить об опасности разрушения.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Martínez I., Andrade C.* Examples of reinforcement corrosion monitoring by embedded sensors in concrete structures // *Cement and Concrete Composites*. 2009. V. 31. P. 545–554.
2. *Nakan Yalciner, Ozgur Eren, Serhan Sensoy.* An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level // *Cement and Concrete Composites*. 2012. V. 42. P. 643–655.
3. *Фурса Т.В., Осипов К.Ю., Дани Д.Д.* Разработка неразрушающего метода контроля прочности бетона с дефектной структурой на основе явления механоэлектрических преобразований // *Дефектоскопия*. 2011. № 5. С. 39–47.
4. *Кужуджанов В.Н.* Численное решение неоднородных задач распространения волн напряжений в твердых телах // *Сообщения по прикладной механике*. Москва : ВЦ АН СССР, 1976. Вып. 6. С. 11–37.
5. *Кужуджанов В.Н., Кондауров В.И.* Численное решение неоднородных задач динамики твердого деформируемого тела // *Проблемы динамики упругопластических сред*. Сер. Механика. Новое в зарубежной науке. Вып. 5. Москва : Мир, 1975. С. 39–84.
6. *Новацкий В.К.* Волновые задачи теории пластичности. Москва : Мир, 1978. 307 с.

7. Уорминг Р.Ф., Кутлер П., Ломакс Г. Нецентральные разностные схемы второго и третьего порядков точности для решения нелинейных уравнений гиперболического типа // Ракетная техника и космонавтика. 1973. Т. 11. № 2. С. 76–85.
8. Численное решение многомерных задач газовой динамики / под ред. К. Годунова. Москва : Наука, 1976. 400 с.
9. Клебанов Я.М., Давыдов А.Н., Папировский В.Л. Использование программного комплекса ANSYS в учебном процессе (Самарский государственный технический университет). Самара : Изд-во СГТУ, 1998. 124 с.
10. Жидков А.В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования. Нижний Новгород, 2006. 115 с. URL: [https://savenkovvn.ucoz.ru/zhidkov\\_ansys.pdf](https://savenkovvn.ucoz.ru/zhidkov_ansys.pdf)
11. Selle A., Fedkiw R., Kim B.-M., Liu Y., Rossignac J. An unconditionally stable MacCormack method // Journal of Scientific Computing. 2008. V. 35. № 2–3. P. 350–371.
12. Dupont T.F., Yingjie Liu. Back and forth, error compensation and correction methods for semi-lagrangian schemes with application to level set interface computations // Math. Comp., In Press. 2006. P. 311–324.
13. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. Москва : Наука, 1977. 944 с.
14. Люкшин Б.А., Уцын Г.Е., Фурса Т.В. Электромеханическая модель пьезосодержащей среды: математическое моделирование механоэлектрических процессов. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2015. 101 с.

## REFERENCES

1. Martínez I., Andrade C. Examples of Reinforcement Corrosion Monitoring by Embedded Sensors in Concrete Structures. *Cement and Concrete Composites*. 2009; 31: 545–554.
2. Hakan Yalciner, Ozgur Eren, Serhan Sensoy. An Experimental Study on the Bond Strength Between Reinforcement Bars and Concrete as a Function of Concrete Cover, Strength and Corrosion Level. *Cement and Concrete Composites*. 2012; 42: 643–655.
3. Fursa T.V., Osipov K.Yu., Dann D.D. Development of Non-Destructive Method for Testing Concrete Strength with Defect Structure Based on Dynamoelectric Transformations. *Defektoskopiya*. 2011; (5): 39–47. (In Russian)
4. Kukudzhanov V.N. Numerical Solution of Non-Dimensional Problems of Stress Wave Propagation in Solids. *Soobshcheniya po prikladnoi mekhanike*. 1976; (6): 11–37. (In Russian)
5. Kukudzhanov V.N., Kondaurov V.I. Numerical Solution of Non-Dimensional Problems of Dynamics of Solid Deformable Body. *Problemy dinamiki uprugoplasticheskikh sred. Ser. Mekhanika. Novoe v zarubezhnoi nauke*. 1975; (5): 39–84. (In Russian)
6. Novatsky V.K. Wave Problems in the Theory of Plasticity. Moscow: Mir, 1978. 307 p. (In Russian)
7. Warming R.F.P., Kutler G. Lomax Second and Third-Order Noncentered Difference Schemes for Nonlinear Hyperbolic Equations. *ARS Journal*. 1973; 11(2): 6–85.
8. Godunov K. Numerical Solution of Multidimensional Problems of Gas Dynamics. Moscow: Nauka, 1976. 400 p. (In Russian)
9. Klebanov Ya.M., Davydov A.N., Papirovsy V.L. ANSYS FE Program in the Educational Process (Samara State Technical University). Available: [cadfem.ru](http://cadfem.ru) (In Russian)
10. Zhidkov A.V. Application of ANSYS FE Program for Solving Problems of Geometric Modeling. Nizhny Novgorod, 2006. 115 p. Available: [https://savenkovvn.ucoz.ru/zhidkov\\_ansys.pdf](https://savenkovvn.ucoz.ru/zhidkov_ansys.pdf) (In Russian)
11. Selle A., Fedkiw R., Kim B.-M., Liu Y., Rossignac J. An Unconditionally Stable MacCormack Method. *Journal of Scientific Computing*. 2008; 35 (2–3): 350–371.
12. Dupont T.F., Yingjie Liu. Back and Forth, Error Compensation and Correction Methods for Semi-Lagrangian Schemes with Application to Level Set Interface Computations. *Mathematics of Computation*. 2006; 311–324. (In press)
13. Yavorsky B.M., Detlaf A.A. Handbook of Physics. Moscow: Nauka, 1977. (In Russian)
14. Lyukshin B.A., Utsyn G.E., Fursa T.V. Electromechanical Model of Piezo-Containing Medium: Mathematical Modeling of Dynamoelectric Processes. Tomsk: TPU, 2015. 101 p. (In Russian)

**Сведения об авторах**

*Борис Александрович Люкишин*, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, lba2008@yandex.ru

*Григорий Евгеньевич Уцын*, канд. физ.-мат. наук, доцент, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, uge23@yandex.ru

**Authors Details**

*Boris A. Lyukshin*, DSc, Professor, Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia, 40, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, lba2008@yandex.ru

*Grigory E. Utsyn*, PhD, A/Professor, Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia, 40, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, uge23@yandex.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 13.03.2024  
Одобрена после рецензирования 28.09.2024  
Принята к публикации 14.11.2024

Submitted for publication 13.03.2024  
Approved after review 28.09.2024  
Accepted for publication 14.11.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 6. С. 112–121.

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 (6): 112–121.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.32

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-112-121

EDN: LIHOCL

## ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ФИБРОПОЛИПРОПИЛЕН-АРМИРОВАННЫХ БЕТОНОВ

Инна Геннадьевна Корнеева, Борис Израилевич Пинус

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия*

**Аннотация.** В работе представлен сравнительный анализ усталостных последствий в обычных и фиброармированных цементно-матричных композитах (фиброполипропилен-армированных бетонов) в процессе многократно повторных нагружений.

**Актуальность.** Учет последствий малоциклового усталости на стадии принятия проектных решений.

**Цель.** Оценить усталостные изменения обычных и фиброармированных цементно-матричных композитов в процессе многократно повторных нагружений с нулевым коэффициентом асимметрии и амплитудой 0,6–0,9. Многократным циклическим воздействиям подвергнуты образцы двух серий: из обычного бетона и фибробетона с полипропиленовыми волокнами эквивалентным диаметром 0,8 мм и длиной 40 мм с объемным процентом армирования 1,5 %.

**Методы.** Использована методика автоматизированного многофакторного контроля всех деформаций и их структурно-значимых компонентов. Динамические испытания выполнялись на испытательном комплексе Instron 5989 в жестком режиме изменения нагрузки с регламентированной скоростью деформирования образца 0,04 мм/с. Измерение деформаций производилось на полной базе в двух направлениях. Фиксация контролируемых параметров велась через каждые 10 циклов воздействий – до 300 циклов. Структурный анализ деформативности проводился с учетом физических закономерностей их развития. В качестве критериальных параметров внутреннего сопротивления приняты показатели остаточных деформаций и цикловая кинетика приращений деформаций.

**Выводы.** Установлены повышенная демпфирующая способность фиброкомпозита, больший потенциал усталостного сопротивления при флуктуации напряженного состояния.

Эта работа является переводом оригинальной статьи, опубликованной на английском языке: Korneeva I.G., Pinus B.I. Dynamical stability of polypropylene fibre reinforced concrete // AIP Conf. Proc. 2022. V. 2434. P. 020006 с разрешения AIP Publishing. Публикация на русском языке позволит русскоязычным читателям получить новую информацию без перевода англоязычной версии статьи, при котором возможна некоторая потеря смыслового содержания текста.

**Ключевые слова:** усталость, фибробетон, деформации, циклические воздействия

**Для цитирования:** Корнеева И.Г., Пинус Б.И. Динамическая устойчивость фиброполипропилен-армированных бетонов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 112–121. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-112-121. EDN: LIHOCL

ORIGINAL ARTICLE

## DYNAMIC STABILITY OF POLYPROPYLENE FIBER-REINFORCED CONCRETE

Inna G. Korneeva, Boris I. Pinus

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The paper presents a comparative fatigue analysis of conventional and fiber-reinforced cement matrix composites under few repeated loads. Consideration of low-cycle fatigue at a design stage.

**Purpose:** The aim of the work is to evaluate fatigue changes in conventional and fiber-reinforced cement matrix composites during repeated loads with zero asymmetry coefficient and 0.6–0.9 amplitude. Subjected to low cyclic loads are ordinary concrete and polypropylene fiber reinforced concrete with an equivalent diameter 0.8 mm and 40 mm length with 1.5 vol.% reinforcement.

**Methodology:** Automated multi-factor strain control indicating structurally relevant components. Dynamic tests are performed on an Instron 5989 testing machine using a hard mode of the load change at 0.04 mm/s strain rate. Strain is measured in two directions. Control parameters are recorded after each 10 cycles until 300 cycles. Residual strain and cyclic kinetics of incremental strain are the key parameters of internal resistance.

**Value:** Detected are the higher damping ability of the fiber composite and higher fatigue resistance potential at the stress-state fluctuation.

**Keywords:** fatigue, fiber reinforced concrete, deformation, cyclic effect

**For citation:** Korneeva I.G., Pinus B.I. Dynamic Stability of Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (6): 112–121. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-112-121. EDN: LIHOCL

### Введение

Многочисленные экспериментально-аналитические исследования малоциклового усталости [1, 2, 3, 4] базируются на оценке и обобщении последствий многократных повторных нагружений (воздействий) флуктуационной интенсивности менее нормативно-расчетного уровня. Их обобщенный анализ позволяет предполагать, что учет малоциклового усталости (МУ) на стадии принятия проектных решений может основываться на принципиальных модельных подходах метода предельных состояний с необходимой (обоснованной) коррекцией предельно допустимых изменений значимых параметров внутреннего сопротивления композитов. Их практическая реализация затруднительна из-за существенных расхождений специалистов в выборе критериальных факторов усталостной деградации и их динамических моделей. Помимо объективных причин (многообразия воздействий, вариативности структур, неоднозначности последствий МУ и др.) сказывается отсутствие единой апробированной методики испытаний.

Совокупность и характер упомянутых факторов взаимодействия конструкций и внешней среды априори определяют усталостные отклики как случайные процессы с различными кумулятивными последствиями [5, 6, 7]. Полагая их эргодичность и используя структуру нормативного метода расчета, усталостные изменения предлагается оценивать рассмотрением и анализом переходных расчетных ситуаций с соответствующей коррекцией значимых параметров внутрен-

него сопротивления. Их критериальные ограничения устанавливаются с использованием статистически обоснованных динамических моделей (эмпирических или графических) кинетики при многократно повторных нагружениях различного уровня, амплитуды и количества.

#### Методика исследования

В отсутствие нормативного регламента испытаний бетона (фибробетона) на малоцикловую усталость и на основе проведенных ранее исследований условия циклического нагружения приняты с учетом:

- а) физических закономерностей развития усталости как многостадийного процесса;
- б) преимущественного развития деструктивных последствий при напряжениях, превышающих границы микроразрушений  $R_{crc}^0 - R_{crc}^v$ ;
- в) сопоставимости относительного уровня напряженного состояния бетона и фибробетона;
- г) результатов численного моделирования колебательных процессов, тождественных по последствиям фоновой сейсмоактивности Восточно-Сибирского региона.

Немногократным циклическим воздействиям подвергнуты образцы двух серий, изготовленных:

- из «ОБ» – бетона состава Ц:П:Щ:В = 1:1,42:3,57:0,55 и расхода цемента М400 – 380 кг/м<sup>3</sup>;
- «ФБ» – бетона аналогичного состава, армированного (1,5 % по объему) полипропиленовыми волокнами диаметром 0,8 мм и длиной 40 мм.

Использована методика комплексного многофакторного контроля отклика испытываемых образцов с автоматической регистрацией времени, скорости нагружения, продольных, поперечных и объемных деформаций на всех этапах испытаний (испытательный комплекс Instron 5989). Измерение деформаций на полной базе в двух направлениях осуществлялось экстензометрами Instron с точностью  $1 \cdot 10^5$  е.о.д.

Конструктивное решение шарнирного механизма Instron обеспечивало автоматическое равномерное нагружение, что исключало начальное центрирование и позволяло фиксировать начальные и остаточные (на циклах) значения деформаций. Модельное представление режима динамических испытаний и характерного отклика образцов представлено на рис. 1. Уровень максимальных нагружений составлял 0,6; 0,7; 0,8 и 0,9, в том числе и в различных сочетаниях при коэффициенте асимметрии  $\rho = 0$ . Фиксация контролируемых параметров велась через каждые 10 циклов при полной базе воздействий до 300 циклов.

Структурный анализ деформативности ведется с учетом физических закономерностей их развития в виде

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ult0,8} &= \varepsilon_0 (\varepsilon_{res}) + \varepsilon_e + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{pl,u}; \\ \varepsilon_{max} &= \varepsilon_0 + \varepsilon_e + \varepsilon_{pl},\end{aligned}$$

где  $\varepsilon_{max}$  – соответствуют деформациям при  $\sigma_{max}$  цикла нагружения;  $\varepsilon_{res}$  – остаточные деформации, при  $\sigma = 0$  (после разгрузки);  $\varepsilon_0$  – начальные (на 1-м цикле) деформации структурного уплотнения («зуб», по О.Я. Бергу [1]);  $\varepsilon_e$  – условно упругие деформации с начальным модулем упругости  $E_b$ ;  $\varepsilon_{pl}$  – пластические де-

формации на этапе возрастающего циклического нагружения;  $\varepsilon_{pl,u}$  – псевдопластические деформации, косвенно характеризующие микро- и макротрещинообразование композита.

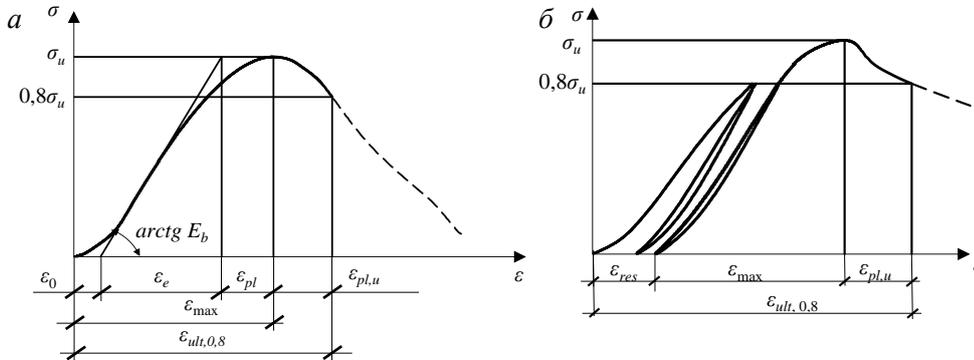


Рис. 1. Деформационная модель статического (а) и постциклического (б) откликов образцов  
 Fig. 1. Deformation model of static (a) and post-cyclic (b) responses of samples

Дискретный анализ деформативности позволяет более адекватно оценивать последствия усталостной трансформации композитов, характеризующихся совместной работой компонентов различных жесткостей.

### Результаты и их обсуждение

К моменту начала динамических испытаний проведены контрольные статические нагружения с целью определения исходных параметров образцов обоих составов (табл. 1).

Таблица 1

#### Исходные значения параметров бетона (ОБ) и фибробетона (ФБ)

Table 1

#### Initial parameters of conventional concrete and fiber-reinforced concrete

Параметр	Ед. изм.	Статистика распределения серий					
		ОБ			ФБ		
		Среднее	Коэффициент вариации, %	Диапазон 95 % обеспеченности	Среднее	Коэффициент вариации, %	Диапазон 95 % обеспеченности
$\sigma_u$	МПа	43,57	3	42,55–44,58	35,79	3	34,93–36,66
$E_b$	МПа	26580	10	24511–28649	22607	8	21162–24052
$\varepsilon_0$	%	0,13	31	0,1–0,16	0,48	36	0,35–0,62
$\varepsilon_e$	%	1,65	10	1,52–1,78	1,59	9	1,47–1,71
$\varepsilon_{pl}$	%	0,69	18	0,59–0,78	0,52	20	0,44–0,61
$\varepsilon_{max}$	%	2,47	7	2,32–2,61	2,60	12	2,35–2,85
$\varepsilon_{ult,0,8}$	%	3,13	6	2,98–3,27	3,18	9	2,94–3,43
$\varepsilon_{u,pl}$	%	0,66	23	0,54–0,78	0,50	13	0,44–0,55
$\varepsilon_u/\sigma_u$	%/ГПа	0,57	8	0,53–0,60	0,73	10	0,67–0,78
$\varepsilon_{ult}/\sigma_u^*$	%/ГПа	0,9	7	0,85–0,95	1,11	6	1,05–1,17

$\sigma_u^* = 0,8\sigma_u$  на нисходящем этапе деформирования

Высокая плотность опытных показателей всех контролируемых параметров (кроме  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_{pl}$ ) позволяет предполагать приемлемость симметричного распределения при оценке диапазона значений 95 % обеспеченности.

В сопоставительном плане введение полипропиленовых волокон привело к ощутимому (18 %) снижению модуля упругости и призмной прочности при одновременном увеличении  $\varepsilon_0$  и потенциала пластического деформирования.

С учетом случайного и физически неоднородного характера усталостных процессов экспериментальная оценка их кинетики при циклических нагружениях ведется путем периодической фиксации значений следующих контролируемых параметров:

$\varepsilon_{\max}(N)$  – максимальные продольные деформации  $N$ -го цикла;

$\varepsilon'_{\max}(N)$  – максимальные поперечные деформации  $N$ -го цикла;

$\varepsilon_{res}(N)$  – максимальные остаточные продольные (после разгрузки) деформации  $N$ -го цикла;

$\varepsilon'_{res}(N)$  – максимальные остаточные поперечные деформации  $N$ -го цикла.

Примерный характер изменения прироста (снижения) деформаций для 2 уровней  $\eta = 0,6$  и  $0,8$  представлен на рис. 2, 3, а их изменения – в табл. 2.

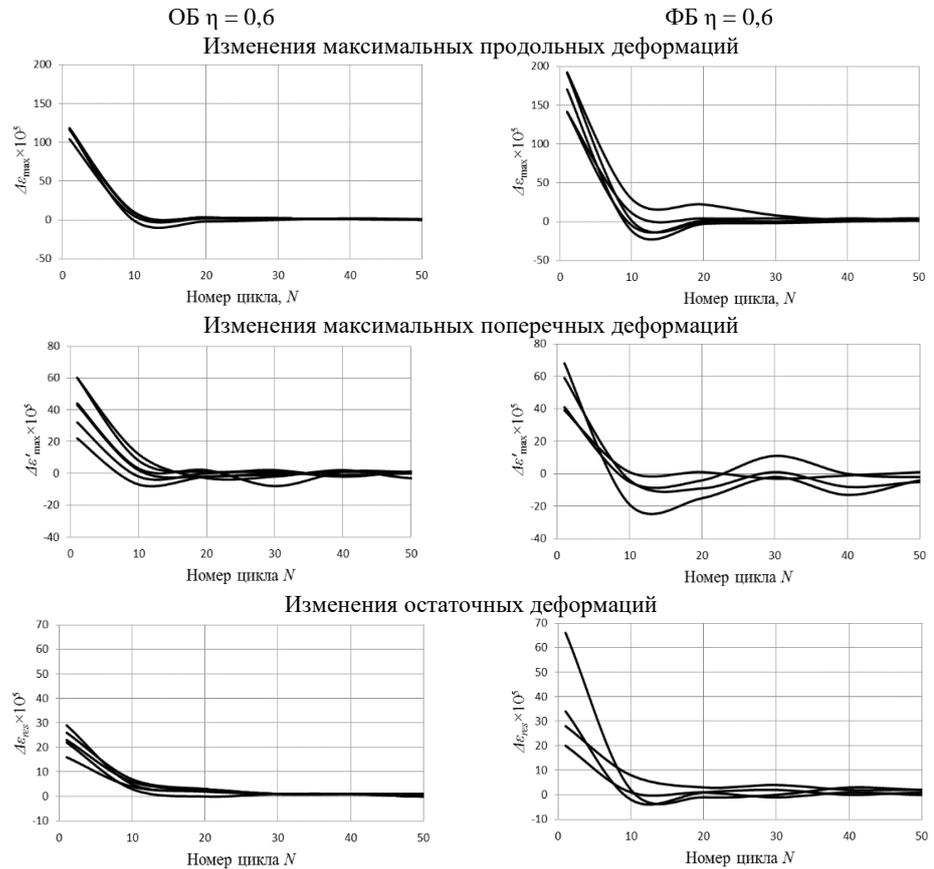


Рис. 2. Изменения контролируемых параметров при амплитуде  $\eta = 0,6$

Fig. 2. Changes in controlled parameters at amplitude  $\eta = 0.6$

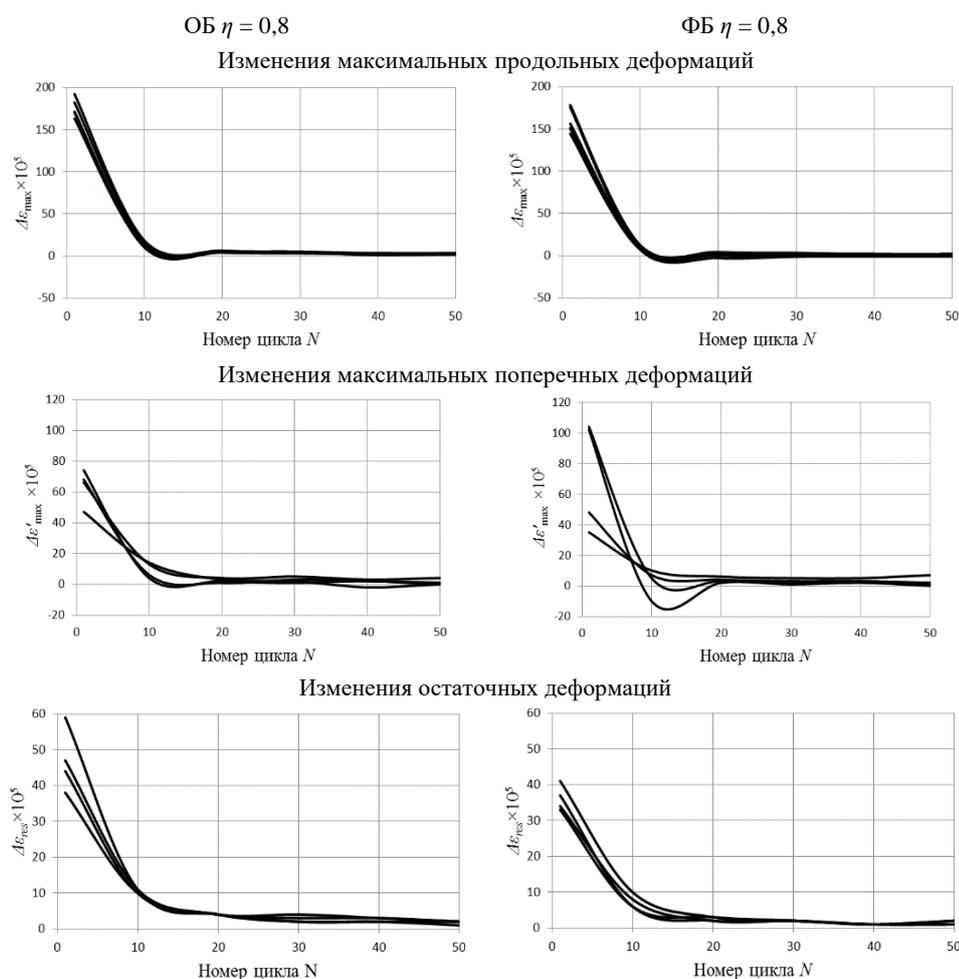


Рис. 3. Изменения контролируемых параметров при амплитуде  $\eta = 0,8$   
 Fig. 3. Changes in controlled parameters at amplitude  $\eta = 0,8$

Сравнительное сходство экспериментальных кривых при большом диапазоне напряжений свидетельствует о тождественности физических закономерностей малоциклового усталости в обычных и фиброармированных бетонах. В динамике накопления повреждений, оцениваемой среднецикловым приростом остаточных деформаций, четко прослеживается многостадийность. Различие состоит в их продолжительности и скорости развития, зависящих от параметров прикладываемых воздействий.

Переходя к анализу количественных показателей контролируемых параметров, необходимо подчеркнуть, что они представляют собой абсолютные и относительные величины в сравнении с их аналогами в 1-м цикле нагружения. Специфическая особенность первого отклика вариативных многофазных и многокомпонентных композитов состоит в структурной трансформации (приспособляемости [8, 9, 10]) к прилагаемым усилиям. Неоднозначный и пре-

ходящий характер начальных последствий, «отягощенных» влиянием несистемных факторов, сказывается на достоверности сравнительного анализа поведения структурно различных композитов. Поэтому сравнение усталостного сопротивления ОБ и ФБ ведется посредством сопоставления удельных (за один цикл базовых воздействий) значений контролируемых параметров (табл. 3). Обращает на себя внимание существенное различие в реакции обычного и фибрированного бетона на возрастание амплитуды нагружения. В обычных бетонах наблюдается увеличение всех контролируемых параметров при  $\eta = 0,6-0,8$ .

Таблица 2

**Изменения контролируемых параметров при усталостных нагружениях разного уровня**

Table 2

**Changes in controlled parameters under different fatigue loads**

Серия	$\eta$	$N$	Продольные деформации в $10^5$ раз				Поперечные деформации в $10^5$ раз			
			$\varepsilon(0)/\varepsilon_{\max}$	$\varepsilon(N)/\varepsilon_{\max}$	$\Delta\varepsilon$	$\Delta\varepsilon_{res}$	$\varepsilon'(0)/\varepsilon'_{\max}$	$\varepsilon'(N)/\varepsilon'_{\max}$	$\Delta\varepsilon'$	$\Delta\varepsilon'_{res}$
ОБ	0,6	50	0,46	0,51	12	10	0,43	0,44	0,8	3,6
		100	0,46	0,52	15	12	0,43	0,44	0,6	3,8
	0,7	50	0,61	0,67	14	13	0,48	0,34	-17	-11
		100	0,61	0,72	23	19	0,48	0,42	-9	-2
	0,8	50	0,7	0,81	16	22	0,63	0,80	17	19
	0,9	50	0,74	0,88	35	36	0,68	1,16	50	56
ФБ	0,6	50	0,64	0,73	23	18	0,37	0,19	-21	-16,3
		100	0,64	0,74	24	20	0,37	0,22	-24	-21,8
	0,7	50	0,66	0,73	19	13	0,28	0,30	2,0	2,8
		100	0,66	0,75	22	17	0,28	0,33	7,0	5,5
	0,8	50	0,63	0,69	16	18	0,27	0,44	44	10,5
	0,9	50	0,64	0,80	38	30	0,45	1,28	127	100

Примечание.  $\varepsilon(0)$ ,  $\varepsilon'(0)$  – значения продольных и поперечных деформаций при загрузении;  $\varepsilon(N)$ ,  $\varepsilon'(N)$  – то же на  $N$ -м цикле.

Таблица 3

**Изменение удельных значений деформаций и периода приспособляемости**

Table 3

**Changes in strain and period of adaptability**

$\eta$	ОБ					ФБ				
	$\Delta\varepsilon_{res}$	$\Delta\varepsilon_{\max}$	$\Delta\varepsilon'_{res}$	$\Delta\varepsilon'_{\max}$	$N_{пр}$	$\Delta\varepsilon_{res}$	$\Delta\varepsilon_{\max}$	$\Delta\varepsilon'_{res}$	$\Delta\varepsilon'_{\max}$	$N_{пр}$
0,6	0,12	0,15	0,04	0,01	50	0,20	0,24	-0,22	-0,24	50
0,7	0,29	0,37	-0,02	-0,09	40	0,21	0,25	0,06	0,07	30
0,8	0,43	0,44	0,34	0,38	30	0,21	0,30	0,21	0,88	25
0,9	0,43	0,45	1,12	1,0	30	0,65	0,50	2,0	2,54	20

Примечания:

1. Значения деформаций увеличены в  $10^5$  раз.
2. Знак «-» означает уменьшение деформаций в процессе циклических воздействий.

Фибробетоны характеризуются относительной стабильностью отклика на изменение усилий в указанном диапазоне. Очевидно, это связано с повышенной демпфирующей способностью, обусловленной включением фиброволокон в восприятие и перераспределение внутренних усилий. Косвенным подтверждением такого предположения является и более низкий уровень периода «приспособляемости»  $N_{пр}$ , повышенная кинетика деформаций в поперечном направлении к циклическому нагружению и изменение «модуля усталости» [11, 12, 13] (табл. 4). Оценка последнего выполнена в предположении «базового» нагружения с амплитудой  $\eta = 0,6$ . При этом увеличение нагрузки на 34 % ( $\eta = 0,8$ ) не сказывается на изменении критериальных параметров малоцикло-вой усталости фиброполипропиленбетонов.

Таблица 4

**Кинетика модуля усталости при различных амплитудных воздействиях**

Table 4

**The kinetics of fatigue modulus at different impacts**

Серия	Показатели	Абсолютные (относительные) значения амплитуды $\eta$			
		0,6 (1)	0,7 (1,17)	0,8 (1,34)	0,9 (1,51)
ОБ	$\Delta\epsilon_{res}^n/\Delta\epsilon_{res}$	1	2,41	3,58	3,58
	$\Delta\epsilon_{max}^n/\Delta\epsilon_{max}$	1	2,46	2,93	3,02
ФБ	$\Delta\epsilon_{res}^n/\Delta\epsilon_{res}$	1	1,05	1,05	3,25
	$\Delta\epsilon_{max}^n/\Delta\epsilon_{max}$	1	1,04	1,25	2,08

Примечание.  $\Delta\epsilon_{res}$  и  $\Delta\epsilon_{max}$  – показатели прироста деформаций при  $\eta = 0,6$ .

**Выводы**

1. Малоцикловая усталость характеризуется неоднозначными изменениями компонентов продольных и поперечных деформаций и, как следствие, критериев соответствующих показателей эксплуатационной пригодности.

2. Дисперсное армирование матриц на основе цемента полипропиленовыми волокнами ведет к снижению кинетики усталости за счет повышения демпфирующей способности и потенциала пластического деформирования.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. Москва : Госстройстандарт, 1961. 96 с.
2. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. Москва : Стройиздат, 1970. 272 с.
3. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов: вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. Москва : Изд-во АСВ, 2011. 639 с.
4. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. Москва : Стройиздат, 1996. 416 с.
5. Liu F., Zhou J. Fatigue strain and damage analysis of concrete in reinforced concrete beams under constant amplitude fatigue loading // Shock and Vibration. 2016. V. 2016. № 3. P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1155/2016/3950140>
6. Morris A.D., Garrett G.G. A comparative study of the static and fatigue behavior of plain and steel fiber reinforced mortar in compression and direct tension // International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete. 1981. № 3(81). P. 73–91. URL: <https://doi.org/10.4271/2004-01-1529>
7. Wang H.L., Song Y.P. Fatigue capacity of plain concrete under fatigue loading with constant confined stress // Mater Struct. 2011. № 44. P. 253–262. URL: <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9624-6>

8. Cachim P.B., Figueiras J.A., Pereira P.A.A. Fatigue behavior of fiber-reinforced concrete in compression // *Cement & Concrete Composites*. 2002. № 24. P. 211–217. URL: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00019-1)
9. Castillo E., Fernández-Canteli A., Ruiz-Ripoll M.L. A General Model for Fatigue Damage Due to Any Stress History // *International Journal of Fatigue*. 2008. № 30. P. 150–164. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.02.011>
10. Yin W., Hsu T.C.C. Fatigue behavior of steel fiber reinforced concrete in uniaxial and biaxial compression // *ACI Materials Journal*. 1995. № 92(1). P. 71–81. DOI: 10.14359/1415
11. Gao L., Hsu T.C.C. Fatigue of concrete under uniaxial compression cyclic loading // *ACI Materials Journal*. 1998. № 95 (5). P. 575–581. DOI: 10.14359/407
12. Korneeva I.G. Cyclic testing of polypropylene fibre reinforced concrete // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. V. 880. P. 012006. DOI: 10.1088/1757-899X/880/1/012006
13. Korneeva I.G., Pinus B.I. Dynamical stability of polypropylene fibre reinforced concrete // *AIP Conf. Proc.* 2022. V. 2434. P. 020006. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0091831>

## REFERENCES

1. Berg O.Ya. Physical Bases of Concrete and Reinforced Concrete Strength. Moscow: Gazstroystandart, 1961. 96 p. (In Russian)
2. Bazhenov Yu.M. Concrete Under Dynamic Loading. Moscow: Stroyizdat, 1970. 273 p. (In Russian)
3. Rabinovich F.N. Composites Based on Dispersed Reinforced Concrete: Theory and Design, Technology, Construction. Moscow: ASV, 2011. 642 p. (In Russian)
4. Karpenko N.I. General Models of Reinforced Concrete Mechanics. Moscow: Stroyizdat, 1996. 407 p. (In Russian)
5. Liu F., Zhou J. Fatigue Strain and Damage Analysis of Concrete in Reinforced Concrete Beams Under Constant Amplitude Fatigue Loading. *Shock and Vibration*. 2016; 2016 (3): 1–7. <https://doi.org/10.1155/2016/3950140>
6. Morris A.D., Garrett G.G. A Comparative Study of the Static and Fatigue Behavior of Plain and Steel Fiber Reinforced Mortar in Compression and Direct Tension. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1981; 3 (81): 73–91. <https://doi.org/10.4271/2004-01-1529>
7. Wang H.L., Song Y.P. Fatigue Capacity of Plain Concrete Under Fatigue Loading with Constant Confined Stress. *Materials and Structures*. 2011; 44: 253–262. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9624-6>
8. Cachim, P.B., Figueiras J.A., Pereira P.A.A. Fatigue Behavior of Fiber-Reinforced Concrete in Compression. *Cement & Concrete Composites*. 2002; 24: 211–217. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00019-1)
9. Castillo E., Fernández-Canteli A., Ruiz-Ripoll M.L. A General Model for Fatigue Damage Due to Any Stress History. *International Journal of Fatigue*. 2008; 30: 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.02.011>
10. Yin W., Hsu T.C.C. Fatigue Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete in Uniaxial and Biaxial Compression. *ACI Materials Journal*. 1995; 92 (1): 71–81. DOI: 10.14359/1415
11. Gao L., Hsu T.C.C. Fatigue of Concrete Under Uniaxial Compression Cyclic Loading. *ACI Materials Journal*. 1998; 95 (5): 575–581. DOI: 10.14359/407
12. Korneeva I.G. Cyclic Testing of Polypropylene Fibre Reinforced Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 880: 012006. DOI:10.1088/1757-899X/880/1/012006
13. Korneeva I.G., Pinus B.I. Dynamical Stability of Polypropylene Fibre Reinforced Concrete. *AIP Conference Proceedings*. 2022; 2434: 020006. <https://doi.org/10.1063/5.0091831>

## Сведения об авторах

Корнеева Инна Геннадьевна, канд. техн. наук, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, [korneeva@yandex.ru](mailto:korneeva@yandex.ru)

*Пинус Борис Израилевич*, докт. техн. наук, профессор, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, pinusb@list.ru

**Authors Details**

*Inna G. Korneeva*, PhD, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov Str., 664074, Irkutsk, Russia, kornee-inna@yandex.ru

*Boris I. Pinus*, DSc, Professor, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov Str., 664074, Irkutsk, Russia, pinus@istu.edu

**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 01.07.2024  
Одобрена после рецензирования 17.10.2024  
Принята к публикации 02.12.2024

Submitted for publication 01.07.2024  
Approved after review 17.10.2024  
Accepted for publication 02.12.2024

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

## CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 6. С. 122–132.

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 (6): 122–132.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 549.642

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-122-132

EDN: MEPBWD

### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СИТАЛЛОВ

**Анатолий Васильевич Мананков, Валерий Михайлович Владимиров**  
*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия*

**Аннотация.** *Актуальность.* Повышение экономической эффективности многих отраслей (энергетической, минерально-сырьевой, металлургической, химической, угольной, строительной, бумажной и т. д.) связывается с новыми материалами с необычным сочетанием физико-механических и химических свойств. Одно их первых мест занимают стеклокристаллические материалы, получающиеся при направленной кристаллизации стекла. Стекла по сравнению с кристаллическими веществами обладают повышенной внутренней энергией (скрытой энергией кристаллизации), поэтому вещество в стеклообразном состоянии метастабильно (термодинамически неустойчиво). Из-за этого обычное стекло при некоторых условиях, а иногда и самопроизвольно начинает кристаллизоваться. Этот процесс традиционно называют «зарухание» или «расстекловывание», а после открытия ситаллов – «ситаллизация». На основе развиваемых представлений о динамическом равновесии потоков энергии и вещества при фазовых переходах в неравновесных открытых системах предлагается термодинамическая модель, учитывающая термическую силу роста кристаллов ситаллов метасиликатного состава.

**Результаты.** Для ситаллов метасиликатного состава –  $M_2M_1[Si_2O_6]$  установлены некоторые из основных зависимостей кинетических параметров от термодинамических свойств. Рост температуры кристаллизации ситаллов происходит по мере увеличения их общей основности  $\Delta Z^{o_{298}}$  на фоне относительного возрастания основности ионов в катионной подрешетке  $M_2$  и особенно в октаэдрической позиции  $M_1$ .

**Ключевые слова:** стёкла, ситаллы метасиликатного состава, зарождение и рост кристаллов, термодинамические потенциалы, динамическое равновесие, термическая сила роста кристаллов, энергия активации

*Для цитирования:* Мананков А.В., Владимиров В.М. Термодинамическая модель кристаллизации ситаллов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 122–132. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-122-132. EDN: MEPBWD

## ORIGINAL ARTICLE

**THERMODYNAMIC MODEL OF GLASS CERAMICS  
CRYSTALLIZATION****Anatoly V. Manankov, Valery M. Vladimirov***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

**Abstract.** The increase in the economic efficiency in many industries (energy, mineral resources, metallurgy, chemical coal, construction) is associated with new materials with unusual combination of physical, mechanical and chemical properties. Glass-ceramic materials obtained by directional glass crystallization rank first among others. Compared to crystalline substances, glass has increased internal energy (latent energy of crystallization). Therefore, the substance in the glassy state is metastable (thermodynamically unstable). Ordinary glass under certain conditions begins to crystallize, sometimes, spontaneously. This process is called drying or devitrification. A thermodynamic model is proposed based on the concept of dynamic equilibrium of energy and matter flows during phase transitions in non-equilibrium open systems. The model considers thermal force of the metasilicate crystal growth. Some of the main dependencies of kinetic parameters on thermodynamic properties are suggested for  $M_2M_1[Si_2O_6]$  metasilicate composition. The crystallization temperature growth occurs as the overall basicity  $\Delta Z_{298}^0$  increases against relative increase in the basicity of ions in the cationic sublattice M2 and, especially, in the octahedral sublattice M1.

**Keywords:** glass, glass ceramics, crystal growth, thermodynamic potential, dynamic equilibrium, thermal force, activation energy

**For citation:** Manankov A.V., Vladimirov V.M. Thermodynamic Model of Glass Ceramics Crystallization. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (6): 122–132. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-122-132. EDN: MEPBWD

Склонность стекол к кристаллизации определяется их химическим составом и внешними параметрами, такими как кинетические особенности температуры и давления. Разработка технологии получения стеклокристаллических материалов на основе силикатных или алюмосиликатных систем является одним из наиболее перспективных направлений современного материаловедения. Основой этого процесса является составление шихты, по минеральному и химическому составу соответствующей пироксеновому модулю [1, 2], плавление исходных материалов до состояния гомогенного расплава и последующая кристаллизация (расплава или стекла), приводящая к формированию особой наномикроструктуры и фазового состава стеклокристаллического материала. Главная общность ситаллов состоит в том, что метод их получения позволяет в широких пределах варьировать их свойства. В зависимости от химического состава стекла, типа катализатора и режима термической обработки получают ситаллы с заранее заданными свойствами. Структура ситаллов характерна тем, что между весьма мелкими нанокристаллами (не более 2–8 мкм) равномерно

распределена стекловидная фаза, количество которой в хорошо закристаллизованных материалах составляет 5–10 % [3–5]. Поэтому одной из важных задач стеклокристаллического материаловедения является определение технологических особенностей синтеза мономинерального стеклокристаллического материала. При изучении и выборе технологических параметров синтеза и разработки стеклокристаллических материалов определяющее значение для их оптимизации имеют термодинамические и кинетические исследования.

В зависимости от исходного минерального сырья для получения ситаллов их можно разделить на *петроситаллы*, получаемые из горных пород (базальтов, диабазов и т. п.), *шлакоситаллы* – из промышленных отходов (шлаков, зол, шламов), *технические ситаллы* – из химического сырья. В связи с появлением в быту СВЧ-печей ситаллы частично вытеснили с рынка фарфоровую посуду, т. к. обладают повышенной диэлектрической проницаемостью и могут легко нагреваться.

Химические формулы минералов, образующихся в неравновесных условиях кристаллизации ситаллов на основе твердых растворов метасиликатного состава, больше всего соответствуют группе пироксенов –  $M_2M_1[Si_2O_6]$  моноклинной сингонии. Здесь  $M_2$  – ионы кальция в восьмерной координации с атомами кислорода, изоморфно замещаемые щелочными ионами  $Na^{1+}$ , иногда  $Li^{1+}$ ;  $M_1$  – совокупность ионов  $Mg^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ , изредка  $Ti^{4+}$  в октаэдрических позициях. Анионы  $[SiO_4]^{4-}$ , редко  $[AlO_4]^{5-}$ ,  $[TiO_4]^{4-}$  слагают одинарные цепочки кремнекислородных тетраэдров, обуславливающие моноклинную сингонию и способствующие получению кристаллов нанодендритной или микронитевидной формы [6]. Обычно получают сложные метасиликаты из 7–8 изоморфов, обладающих широкими границами взаимной растворимости по типу твердых растворов, чем существенно отличаются от природных твердых растворов [Там же]. Малый средний размер кристаллов ( $< 10$  мкм) способствует получению материалов с повышенными механическими свойствами, а игольчатый и дендритный габитус кристаллитов позволяет использовать их в качестве армирующего структуру наполнителя ряда материалов с малой хрупкостью и необычно высокой прочностью.

Разработанные нами материалы класса СИКАМ метасиликатного и алюмосиликатного составов на основе недефицитного нерудного сырья месторождений и многотоннажных промышленных отходов имеют однородную стеклокристаллическую структуру и обладают уникальным комплексом физико-механических и химических свойств, а также электроизоляционными и декоративными свойствами, что позволяет использовать их в качестве инновационных многофункциональных материалов [7]. В основе технологических разработок лежит созданная нами теория субсолидусной ликвации с образованием когерентных структур в переохлажденных силикатных и алюмосиликатных системах [8], послужившая научной базой для открытия нового класса материалов – сикамов (товарный знак № 92355). Новизна материалов подтверждена более чем 35 патентами и созданием ресурсосберегающих технологических линий опытно-заводского и промышленного масштаба.

Отличие этих материалов от традиционных возникает на стадии подбора их химического и минерального состава с учетом пределов изоморфизма и относи-

тельной устойчивости полиморфных модификаций в изучаемых системах, а также в количественных и качественных особенностях кристаллических структур, контролируемых и управляемых составом и технологическими параметрами.

Процессы, происходящие при получении ситаллов и сикамов, являются неравновесными, однако в ходе зародышеобразования и роста кристаллов система является «мозаично-равновесной» [9], и к ней могут быть применены уравнения термодинамики. Равновесное состояние может быть охарактеризовано двумя параметрами: энтропией и термодинамическим потенциалом. При этом функция энтропии стремится к максимуму, а термодинамический потенциал – к минимуму.

Исходя из положения, что в силикатной системе есть внутренние элементы, представляющие собой кристаллическую структуру, и внешние – расположенные на её границах, образующие метастабильные фазы, А.В. Маликовым вводится понятие топологических микроструктур, на основе которых автор сделал попытку при помощи теории графов описать явление существования нескольких вещественных уровней кристаллического вещества в природных минералах [10]. Такой подход позволяет выделить четыре типа механизмов преобразования топологической микроструктуры, описывающих габитусы кристаллов и их агрегации в генетической минералогии [11]. Однако этот подход не отражает физики процессов, происходящих при их формировании при тепловых и механических воздействиях.

Нами предлагается в термодинамическом подходе ввести новые понятия для движущей силы процессов образования зародышей и роста кристаллов минеральных фаз. В настоящее время характеристикой движущих сил физико-химических систем в ходе фазовых переходов являются термодинамические потенциалы, которые дают направление их протекания. Движущей же силой процесса являются энергии активации зародышеобразования и кристаллизации. Энергия активации зародышеобразования отражает внутренние связи топологической структуры кристалла. Внешние связи зародышей со средой отражаются другим понятием – термической силой кристаллизации. Соотношение этих двух величин позволяет регулировать структурный микро- и мезоуровень в системе «стекло – кристалл».

Целью работы является экспериментальное изучение процессов фазовых превращений и разработка динамической модели кристаллизации в системе метасиликатов для получения материалов сикамов с заданной структурой и свойствами путем учета потоков энергии и массы вещества.

Процесс фазовых переходов в общем виде определяется противодействием термодинамических потенциалов и рассеяния энергии за счёт энтропийного фактора. Между этими тенденциями могут существовать взаимозависимости, для оценки которых нами введено понятие «термическая движущая сила кристаллизации», которую можно определить из уравнений термодинамического равновесия.

Движущая сила в системе «стекло – кристалл» зависит от энтропийного фактора  $S$ : чем больше  $S$ , тем меньше воздействие термодинамического потенциала за счет рассеяния энергии. В целом действие потенциала в ходе фазовых переходов должно иметь вероятностный характер за счет изоморфных превра-

щений на границе зародышей и кристаллитов. Поэтому движущая сила во время кристаллизации может определяться из отношения существующей величины энтропии  $S$  к ее начальному значению  $S_0$ .

### Модель термодинамического равновесия между стеклообразной и кристаллической фазами

Для системы «стекло – кристалл», исходя из термодинамических условий равновесия, можно записать уравнение функции энтальпии  $H$  для изобарных условий:

$$dH = S_k \cdot dT + F \cdot dL, \quad (1)$$

где  $S_k$  – энтропия кристаллической фазы;  $T$  – температура;  $F$  – термическая движущая сила кристаллизации;  $L$  – линейный размер прироста кристаллов.

Функция энтальпии в однофазной системе для изобарных условий записывается в виде [12]:

$$H = T \cdot S, \quad (2)$$

где  $S$  – функция энтропии.

Условие термодинамического равновесия выражается в равенстве нулю дифференциала функции энтальпии, формула (1) [9]. В неравновесных условиях может существовать динамическое равновесие; оно выражается в равенстве потоков энергии и массы при фазовом превращении. При этом характеристикой динамики системы на границе «стекло – кристалл» может быть отношение порядка к беспорядку  $H_{кр}/S$ . Если в системе происходит рост энтропии, то это уменьшает ее движущую силу. Согласно принципу Ле-Шателье, в системе «стекло – кристалл» возникает движущая сила за счет поглощения тепла, противодействующая внешнему потоку энергии. При этом достижение равновесия наблюдается при росте объема отдельных кристаллов и суммарного объема кристаллической фазы. Механизм реализации данного процесса происходит на границах кристаллов и потому может считаться локальным.

Локальное динамическое равновесие в «мозаично-равновесной» системе может быть записано в форме

$$H_{кр}/S = LF/S_0, \quad (3)$$

где  $S_0$  – энтропия начала кристаллизации стекла.

Левая часть в формуле (3) выражает внешнюю динамическую силу, правая часть – противодействующую ей внутреннюю – роста кристаллов.

Действительно, функция  $H_{кр}$  удовлетворяет термодинамическим уравнениям (1), (2) с учётом относительного вклада энтропии в процесс кристаллизации:

$$\left( \frac{\partial H_{кр}}{\partial l} \right)_s = FS/S_0; \quad (4)$$

$$\left( \frac{\partial H_{кр}}{\partial S} \right)_L = LF/S_0 = H/S = T. \quad (5)$$

Поэтому термическую движущую силу кристаллизации можно вычислить непосредственно из формулы (3), но для её практического применения заметим, что в известной формуле зависимости теплоемкости  $C_p$  от температуры [13]:

$$C_p = a + bT^{-3} + cT^{-2} \cdot 10^5. \quad (6)$$

В интервале кристаллизации стекол можно ограничиться линейным коэффициентом. Обозначим его  $A$ , тогда изменение функции энтальпии  $\Delta H$  и энтропии  $\Delta S$  равно:

$$\Delta H = A(T - T_0)^2/2; \quad (7)$$

$$\Delta S = A(T - T_0). \quad (8)$$

При этом  $S_0 = A \cdot T_0$ , где  $T_0$  – температура начала кристаллизации стекла.

Подставляя формулы (7), (8) в формулу (3), получаем выражение для термической силы кристаллизации:

$$F = S_0(T - T_0)/2L. \quad (9)$$

Формула (9) фактически показывает, что при достижении локального равновесия в «мозаично-равновесной» системе на начальной стадии кристаллизации относительная величина термической силы уменьшается за счет роста  $S_0$  при разупорядочении. Для восстановления динамического равновесия должен происходить рост кристаллов и объема кристаллической фазы при данной величине  $\Delta T$ .

#### Методика изучения процессов кристаллизации метасиликатных стекол

Для вычисления  $F$  проведены эксперименты по кристаллизации стекол. Химический состав стёкол представлен в табл. 1. Объектами исследования были стекла, полученные на основе суглинков Марковского, Кедровского, Моряковского месторождений Томской области с добавками известняков Каменского месторождения из расчета проектирования метаалюмосиликатных составов.

Таблица 1

#### Химический состав синтезированных стёкол, масс. %

Table 1

#### Chemical composition of synthesized glasses, wt. %

Оксиды	Суглинки месторождений		
	Марковского	Кедровского	Моряковского
SiO <sub>2</sub>	53,22	54,59	55,78
TiO <sub>2</sub>	1,27	0,68	0,20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,26	10,74	5,98
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,45	4,07	2,01
FeO	1,30	1,03	0,80
MgO	1,33	1,21	0,77
CaO	20,05	18,63	26,56
MnO	0,11	0,13	0,12
Na <sub>2</sub> O	10,00	7,52	6,44
K <sub>2</sub> O	2,08	1,30	0,99
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,17	0,19	0,35
Σ	100,0	100,0	100,0

Температура плавления стёкол выбиралась исходя из диаграммы состояния системы  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O}$ . По данным образования и растекания капель на подложке, а также по данным дериватографического анализа определены температуры начала плавления исходных составов, которые составляли 1000–1100 °С. Температура гомогенизации находилась в интервале 1340–1370 °С. Варку стёкол производили в корундовых стаканах в силитовых печах со скоростью нагрева 2,5°/мин и выдержкой для гомогенизации расплава в течение 1–1,5 ч.

Из стёкол приготовлены образцы в форме кубиков размерами 15×15×15 мм. Все стекла с учетом результатов ДТА нагревались в муфельной печи в диапазоне 800–900 °С с интервалом 20 градусов, время изотермической выдержки составляло 40 мин. Размеры кристаллов определялись при помощи микроскопа МБС-2 после полировки поверхности образцов алмазными пастами. Средний размер кристалла  $l$  вычисляли по 15 замерам методом секущих [14].

Экспериментальные значения  $l$  представлены в табл. 3. Значения теплоёмкости  $C_p$  для изученных составов взяты из работы [5]. По этим данным и температурам начала кристаллизации рассчитаны значения  $S_0$  (табл. 2).

Таблица 2

## Исходные данные для термодинамических расчётов

Table 2

## Initial data for thermodynamic calculations

№ состава	$C_p$ , Дж/г·К (800 °С)	$C_p$ , Дж/г·К (расплав)	$A \cdot 10^{-4}$	$T_0$ , К	$S_0$ , Дж/г·К
1	1,1792	1,2903	2,22	1073	0,2382
2	1,1787	1,2069	0,56	1133	0,0634
3	1,1724	1,2898	2,35	1163	0,2733

Длина прироста кристаллической фазы определяется произведением линейной плотности кристаллов  $n$  и средней длины  $l$ :

$$L = n \cdot l. \quad (10)$$

На основе величин  $S_0$  (табл. 2),  $(T - T_0)$  (табл. 3),  $L$  (10) по формуле (9) произведён расчёт термической силы вблизи температуры начала роста кристаллов. Данные представлены в табл. 3, из которых следует, что чем меньше размер образующихся кристаллов, тем больше термическая сила при одинаковой степени переохлаждения. Это вытекает из обратно пропорциональной зависимости  $F$  и  $L$  в формуле (9).

Однако при подъёме температуры она может уменьшаться (состав 1), увеличиваться (состав 3) или иметь экстремум (состав 2). Это связано с различием минимального состава и существованием метастабильных состояний зародышей в процессе кристаллизации.

Еще более интересным является вопрос сравнения энтальпии  $\Delta H$  и работы термической силы при росте кристаллической фазы. Значения данных величин для исследуемых температурных интервалов представлены в табл. 4.

Таблица 3

**Зависимость термической силы кристаллизации метасиликатных составов от температуры и размера кристаллов  $l$ , их количества  $n$  на 1 мм**

Table 3

**Dependence of thermal crystallization force of metasilicate compositions on temperature and crystal size  $l$ , number  $n$  per 1 mm**

№ состава	$n$	$l \cdot 10^{-3}$ м	$(T - T_0)$ , °C	$F \cdot 10^3$ , Н
1	12	0,04	20	4,96
1	12	0,10	40	7,73
1	12	0,20	60	6,21
2	13	0,32	20	0,59
2	13	0,60	40	0,32
2	13	0,70	60	0,42
3	11	0,10	20	4,96
3	11	0,15	40	6,62
3	11	0,20	60	7,45

Таблица 4

**Сравнительные значения энтальпии  $\Delta H$  и работы внутренних сил  $F \cdot L$  при кристаллизации стёкол**

Table 4

**Enthalpy  $\Delta H$  and internal force  $F \cdot L$  during glass crystallization**

Состав	$\Delta H$ , Дж/г	$F \cdot L$ , Дж/г	$\Delta H / F \cdot L$	$T$ , °C
1	44,4	4,64	9,57	820
1	177,6	9,28	19,1	840
1	399,6	13,92	28,7	860
2	11,2	0,634	17,77	860
2	44,8	1,268	35,33	880
2	100,8	1,902	52,99	900
3	47,0	5,460	8,60	890
3	188,0	10,920	17,22	910
3	423,0	16,380	25,82	950

Анализ данных табл. 4 показывает, что с повышением температуры уменьшается относительная величина работы термических сил. Это обусловлено тем, что при увеличении температуры уменьшается вязкость системы и облегчены процессы её структурной перестройки, что способствует повышению скорости роста кристаллов за счёт меньшей энергии упорядочения ансамблей частиц вблизи поверхности растущих кристаллов.

В расплаве могут формироваться сиботаксические *C*-ансамбли, которые в метастабильном состоянии могут существовать в стеклах. *C*-ансамбли в метасиликатных расплавах можно рассматривать как совокупность виртуальных частиц с катионами модификаторов и анионными группами стеклообразователей, формирующих химические соединения. Поскольку расплавы этого класса представляют собой конкретную метасиликатную неравновесную систему, то в ней происходят процессы объединения и разложения молекулярных частиц или мицелл, химическая интеграция и химическая структурная дифференциация, определяющие особенности процессов субсолидусной ликвации и последующей кристаллизации. Изменение объёмов ликвационных областей уменьшает градиент  $dT/dV$  и способность переохлаждённых расплавов к зародышеобразованию.

Хотя наибольшей поляризующей способностью обладают ионы  $Zr^{4+}$  и  $Ti^{4+}$ , область ликвации вблизи которых в 1,5 раза больше, чем у  $Mg^{2+}$ , и в 2 раза больше, чем у  $Ca^{2+}$ , именно данные ионы могут быть источниками зародышеобразования, благодаря химическим реакциям в сиботаксических группах, которые и выражают локальное динамическое равновесие в метасиликатной системе.

Анализ сводной диаграммы изученных кинетических серий по кристаллизации стекол на основе различного минерального сырья показал, что на термическую силу существенно влияют не только малые вариации химического состава, но и минеральный состав шихты и генетическая история минеральных компонентов. Стекла на основе кальциевых силикатов имеют более высокие скорости кристаллизации, а стекла диопсидового состава – более высокие скорости зародышеобразования. Для изученных стекол с повышением температуры до достижения динамического равновесия между фазами, формула (9), работа сил кристаллизации уменьшается, что соответствует большой скорости кристаллизации при незначительном увеличении скорости зародышеобразования.

В работе И. Пригожина в рамках теории диссипативных структур рассматривается динамическое равновесие в открытых системах и выдвинут принцип максимума роста энтропии [15]. Позднее синергетический подход расширил это понятие и нашел область, отвечающую равновесию в форме аттрактора [16]. Но в рамках математических моделей существуют системы со странными аттракторами, которые в течение длительного времени не могут прийти к равновесию. Это связано с тем, что наряду с диссипативными структурами в таких системах могут существовать энергетические потоки, разупорядочивающие и упорядочивающие движения подсистем, не учитываемые моделями. Поэтому для более полного описания процесса достижения равновесия нужно рассматривать движение потоков как результирующее действие порядка и беспорядка, что и представлено в данной работе.

Введенное нами понятие термической силы может быть применено для характеристики получения стеклокристаллических материалов и как физическая величина, отражающая движущую силу процессов, происходящих на границе зерен при получении ситаллов методом спекания.

Таким образом, на основе понятия динамического равновесия сделана оценка термической движущей силы роста кристаллов и вычислена работа на стадиях кристаллизации метасиликатных систем. Показано, что с повышением

температуры относительная величина работы кристаллизации уменьшается, что способствует повышению скорости роста зародышей и отдельных кристаллов в результате упорядочения сиботаксических ансамблей.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Manankov A.V., Gasanova E.R., Kharitonova N.V.* Crystal-Chemical Principles Underlying Monomineralic Composition Calculation for Glass–Ceramic // *Inorganic Materials*. 2018. V. 54. № 9. P. 931–939. URL: <https://doi.org/10.1134/S0020168518090078>
2. Патент № 2687014 Российская Федерация, МПК C03B 1/00 (2006.01). Способ приготовления метасиликатной ситалловой шихты : № 2018116526 : заявл. 03.05.2018 : опубл. 06.05.2019 / Мананков А.В., Гасанова Э.Р., Харитонов Н.В. Бюл. № 13. 10 с.
3. *McMillan P.W.* Glass-Ceramics. New York : Academic Press, 1964. 248 с.
4. *Павлушкин Н.М.* Основы технологии ситаллов. 2 изд. Москва, 1979. 360 с.
5. *Мананков А.В., Яковлев В.М., Владимиров В.М., Бабанский И. Д.* Экспериментальное исследование условий кристаллизации петруггических расплавов и стекол. Томск : Изд-во ТГУ, 1976. 202 с.
6. *Мананков А.В., Владимиров В.М., Страхов Б.С.* Механизм структурной организации и модель неравновесной кристаллизации стекол (обзор) // Стекло и керамика. 2015. № 1. С. 3–9. DOI: 10.1007/s10717-015-9710-x. EDN: WQDKCV
7. *Мананков А.В., Горюхин Е.Я., Локтюшин А.А.* Волластонитовые, пироксеновые и другие материалы на основе промышленных отходов и недефицитного природного сырья. Томск : Изд-во ТГУ, 2002. 168 с.
8. *Мананков А.В., Шаранов В.Н.* Кинетика фазовых переходов в базитовых расплавах и магмах. Новосибирск : Наука СО АН СССР, 1985. 176 с.
9. *Коржинский Д.С.* Физико-химические основы анализа парагенезиса минералов. Москва : Наука АН СССР, 1957. 184 с.
10. *Malikov A.V.* Structural theory of space-time and intrapoint symmetry // *Computers & Mathematics with Applications*. 1989. V. 17. № 1–3. P. 279–299. URL: [https://doi.org/10.1016/0898-1221\(89\)90163-6](https://doi.org/10.1016/0898-1221(89)90163-6)
11. *Маликов А.В.* Структурная теория пространства-времени и ее приложения в минералогии и кристаллографии // Математические модели в расшифровке генезиса минералов : сборник научных статей. Москва : ИМГРЭ, 1989. С. 4–41.
12. *Базаров И.П.* Термодинамика. Москва : Наука, 1961. 290 с.
13. *Наумов Г.Б., Рыженко И.А., Ходаковский В.А.* Справочник термодинамических величин. Москва : Атомиздат, 1975. 240 с.
14. *Кузнецов В.Д.* Кристаллы и кристаллизация. Москва : Гостехиздат, 1954. 411 с.
15. *Пригожин И.* От возникающего к существующему. Москва : Наука, 1985. 327 с.
16. *Хакен Г.* Синергетика. Москва : Мир, 1985. 449 с.

## REFERENCES

1. *Manankov A.V., Gasanova E.R., Kharitonova N.V.* Crystal-Chemical Principles Underlying Monomineralic Composition Calculation for Glass-Ceramics. *Inorganic Materials*. 2018; 54 (9): 931–939.
2. *Manankov A.V., Gasanova E.R., Kharitonova N.V.* Preparation Method for Metasilicate Glass Ceramic Mixture. Patent Rus. Fed. N 06.05. 2019. (In Russian)
3. *McMillan P.W.* Glass-Ceramics. New York: Academic Press, 1964. 248 p.
4. *Pavlushkin N.M.* Fundamentals of Sital Technology. 2nd ed., Moscow, 1979. 360 p. (In Russian)
5. *Manankov A.V., Yakovlev V.M., Vladimirov V.M., Babansky I.D.* Crystallization Conditions of Petrurgical Melts and Glasses. Tomsk: TSU, 1976. 202 p. (In Russian)
6. *Manankov A.V., Vladimirov V.M., Strakhov B.S.* Mechanism of Structural Organization and Model of Non-Equilibrium Crystallization of Glasses. A Review. *Glass and Ceramics*. 2015; (21): 3–9. DOI: 10.1007/s10717-015-9710-x. EDN: WQDKCV
7. *Manankov A.V., Goryukhin E.A., Loktyushin A.A.* Wollastonite, Pyroxene and Other Materials from Industrial Waste and Abundant Natural Raw Materials. Tomsk: TSU, 2002. 168 p. (In Russian)

8. *Manankov A.V., Sharapov V.N.* Kinetics of Phase Transitions in Basic Melts and Magmas. Novosibirsk: Nauka, 1985. 176 p. (In Russian)
9. *Korzhinsky D.S.* Physicochemical Foundations of Mineral Paragenesis Analysis. Moscow, 1957. 184 p. (In Russian)
10. *Malikov A.V.* Structural Theory of Space-Time and Intrapoint Symmetry. *Computers & Mathematics with Applications*. 1989. V. 17. No. 1–3. Pp. 279–299. [https://doi.org/10.1016/0898-1221\(89\)90163-6](https://doi.org/10.1016/0898-1221(89)90163-6) (In Russian)
11. *Malikov A.V.* Space-Time Structural Theory and its Application in Mineralogy and Crystallography. In: *Mathematical Models in Mineral Genesis Decoding*. Moscow, 1989. Pp. 4–41. (In Russian)
12. *Bazarov I.P.* Thermodynamics. Moscow: Nauka, 1961. 290 p. (In Russian)
13. *Naumov G.B., Ryzhenko I.A., Khodakovskiy V.A.* Handbook of Thermodynamic Quantities. Moscow: Atomizdat, 1975. 240 p. (In Russian)
14. *Kuznetsov V.D.* Crystals and Crystallization. Moscow: Gostekhizdat, 1954. 411 p. (In Russian)
15. *Prigozhin I.* From Emerging to Existing. Moscow: Nauka, 1985. 327 p. (In Russian)
16. *Haken H.* Synergetics. Moscow: Mir, 1985. 449 p. (Russian translation)

#### Сведения об авторах

*Мананков Анатолий Васильевич*, докт. геол.-мин. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, mav.39@mail.ru

*Владимиров Валерий Михайлович*, канд. хим. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, glovani.v@mail.ru

#### Authors Details

*Anatoly V. Manankov*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, mav.39@mail.ru

*Valery M. Vladimirov*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, glovani.v@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 14.11.2024  
Одобрена после рецензирования 26.11.2024  
Принята к публикации 02.12.2024

Submitted for publication 14.11.2024  
Approved after review 26.11.2024  
Accepted for publication 02.12.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 6. С. 133–145.

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 (6): 133–145.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.327.333

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-133-145

EDN: MWDHCV

## ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Юрий Сергеевич Саркисов, Николай Петрович Горленко,  
Дмитрий Юрьевич Саркисов, Ольга Александровна Зубкова**

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

**Аннотация.** *Актуальность.* Импульсная терагерцовая спектроскопия получила широкое распространение в научных исследованиях быстропротекающих процессов в различных структурах на нано-, мезо- и макроуровнях. В строительных технологиях терагерцовое излучение до самого последнего времени практически не применялось. С развитием теории и практики терагерцовой спектроскопии ее способы могут успешно дополнять классические методы физико-химического анализа строительных материалов различного технического назначения, особенно теплоизоляционных в широком диапазоне плотности и электроизоляционных свойств. Наиболее актуальны данные исследования в настоящее время в связи с разработкой составов и технологий эффективных теплоизоляционных материалов на основе отходов целлюлозно-бумажной промышленности, в том числе различных видов некондиционного сырья.

*Цель работы* – обосновать применение терагерцовой спектроскопии в изучении механизмов формирования структур твердения строительных материалов различной природы.

*Методы.* При проведении исследований для изучения механизма протекающих процессов использован метод терагерцовой спектроскопии и структурно-механические методы анализа.

*Результаты.* Установлено, что наиболее высокими эксплуатационными характеристиками обладает система на основе модифицированного полиуретана и бумажного наполнителя. Показано, что наиболее сильное поглощение терагерцового излучения в исследуемых образцах наблюдается в области частот выше 1–2 ТГц.

По результатам проведенных исследований сделан вывод о существовании корреляции между величиной теплопроводности и коэффициентом поглощения образца.

**Ключевые слова:** терагерцовая спектроскопия, строительные материалы, теплоизоляционные материалы, полиуретановые полимеры, картон типа МС-5Б, наноразмерные добавки, прочность, водостойкость, плотность

**Для цитирования:** Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Саркисов Д.Ю., Зубкова О.А. Терагерцовая спектроскопия строительных материалов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 133–145. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-133-145. EDN: MWDHCV

## ORIGINAL ARTICLE

**TERAHERTZ SPECTROSCOPY  
OF CONSTRUCTION MATERIALS****Yuri S. Sarkisov, Nikolay P. Gorlenko, Dmitry Y. Sarkisov,  
Olga A. Zubkova***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

**Abstract.** Pulsed terahertz spectroscopy is widely used in scientific research of fast processes in various structures at nano-, meso- and macrolevels. Terahertz radiation has not been not applied in construction technologies until very recently. With the development of terahertz spectroscopy, it successfully complements classical methods of physical and chemical analysis of building materials for various engineering purposes, especially for heat-insulating materials in a wide range of density and electrical insulating properties. These studies are currently relevant for the development of compositions and technologies of effective thermal insulation materials based on wastes of the pulp and paper industry, including various types of substandard raw materials.

**Purpose:** The aim of the work is to substantiate the application of terahertz spectroscopy in studying the formation of curing structures of building materials of different nature.

**Methodology:** Terahertz spectroscopy and strength analysis to study ongoing processes.

**Research findings:** It is found that the system based on modified polyurethane and paper filler, has the highest performance characteristics. It is shown that the highest absorption of terahertz radiation in the samples occurs in the frequency range above 1 to 2 THz.

**Keywords:** terahertz spectroscopy, building materials, thermal insulation, polyurethane polymers, MS-5 cardboard, nanoscale additives, strength, water resistance, density

**For citation:** Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P., Sarkisov D.Yu., Zubkova O.A. Terahertz Spectroscopy of Construction Materials. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (6): 133–145. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-133-145. EDN: MWDHCV

В России ежегодно образуется около 8 млн т бумажных отходов, но перерабатывается в настоящее время только 4,1 млн т. Для сравнения: в Китае ежегодно поставляется около половины всего мирового объема бумажного сырья для дальнейшей переработки. Целлюлозная промышленность в Китае рентабельна и приносит ощутимые прибыли. В Европейском союзе ежегодно образуется 11 млн т отходов, из которых только 70 % приходится на переработку бумаги [1]. В настоящее время в нашей стране не хватает производственных мощностей для утилизации и переработки уже существующих накоплений бумажных отходов. Значительная часть отходов подвергается гниению и является одним из загрязнителей окружающей среды. В этой связи актуальным остается разработка составов и технологий использования отходов целлюлозно-бумажной промышленности для создания и производства строительных материалов различного технического назначения. Наибольшее распространение среди них получили теплоизоляционные материалы, например эковата. Состав этого утеплителя содержит 81 % переработанной целлюлозы, 7 % тетрабората натрия и 12 % природных антисептиков [2].

Главным недостатком целлюлозно-бумажного наполнителя является высокое значение водопоглощения и низкая водостойкость. Эта задача решается путем применения традиционных гидрофобных составов. Предпринимаются попытки

расширить ассортимент экологически чистых гидрофобизаторов. Например, неорганические наночастицы  $\text{SiO}_2$ , нанесенные на нановолокна целлюлозы [3].

В работе [4] предлагается гидрофобное покрытие, основанное на сочетании натурального каучукового латекса и бутилстеарата. Составы способствуют значительному снижению показателя водопоглощения с 128 до 0,8 г/м<sup>2</sup>. Второй важный компонент при получении композитов – связующее. Здесь можно выделить синтетические связующие, большинство из которых – гидрофобные вещества. Их основными недостатками являются чувствительность к изменению температуры и ограниченная механическая прочность. Необходимо отметить, что неорганические вяжущие, такие как цемент, гипс и известь, значительно уступают полимерным связующим из-за придания создаваемым материалам повышенной плотности. Многочисленные исследования как отечественных, так и зарубежных ученых, в том числе и предварительные эксперименты, проведенные авторами настоящей работы, показали, что даже в поризованных цементных системах не удается одновременно обеспечить, с одной стороны, низкую плотность, а с другой – высокую прочность и водостойкость образцов цементного камня. В этой связи в качестве связующих широко применяют клеи и адгезивы различного состава органической природы, такие как мочевино-меламино-формальдегидная смола, вулканизирующий каучуковый клей, казеин, мочевиноформальдегидная смола, поливинилацетат, поливиниловый спирт и др.

До недавнего времени для исследования механизма протекающих процессов в рассматриваемых материалах широко применялись в основном методы ИК-спектроскопии. Терагерцовая спектроскопия начала развиваться сравнительно недавно.

Целью настоящей работы ставилось обосновать применение терагерцовой спектроскопии в изучении механизмов формирования структур твердения строительных материалов различной природы.

С целью изучения механизма взаимодействия связующего с бумажным наполнителем проводили спектральные исследования на импульсном терагерцовом спектрометре T-Spec 1000 (Teravil, Литва) с приемником в виде фотопроводящих дипольных антенн на основе LT-GaAs. Прибор характеризуется высокими спектральным разрешением (до 1 ГГц) и динамическим диапазоном (не менее 90 дБ на частоте 400 ГГц), широким спектральным диапазоном (до 5 ТГц). Такие характеристики позволили на образцах толщиной 1–2 см с высокой степенью (локальной) неоднородности получить временные формы терагерцовых импульсов, прошедших сквозь образец.

Импульсная терагерцовая спектроскопия во временной области (THz-TDS) стала стандартным инструментом научных лабораторий для исследования быстропротекающих процессов в полупроводниковых структурах [5, 6], измерения диэлектрических свойств различных сред, спектроскопии колебательных спектров молекулярных и кристаллических структур, в том числе наноразмерных и композитных материалов [7, 8]. В предыдущие годы было продемонстрировано, что терагерцовые технологии, в частности импульсная терагерцовая спектроскопия, могут применяться для контроля толщины лакокрасочных покрытий в автомобилестроительной, строительной и кораблестроительной индустрии, для определения однородности и химического состава фармацевтиче-

ской продукции, состава и структуры предметов искусства и археологических объектов и т. п.

В строительной технологии терагерцовое излучение может применяться для определения плотности используемых материалов, поиска пустот и пор, определения наличия воды (сырости) в конструкциях, поиска внутренних металлических объектов, таких как арматура [9, 10, 11, 12, 13]. Кроме того, непосредственно определение показателей преломления и коэффициентов поглощения, или эквивалентно действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости, строительных материалов может представлять интерес, т. к. в этом диапазоне частот накопление базы соответствующих спектров долгое время было затруднено из-за отсутствия необходимых экспериментальных инструментов. В частности, такие спектральные данные интересны в связи с развитием беспроводных технологий связи, которые начинают использовать нижние терагерцовые частоты для повышения скорости передачи данных [12].

Терагерцовые методы измерений могут успешно дополнять классические методы, основанные на теплопереносе [7] или просвечивании рентгеновским излучением. При этом, как правило, используемые в строительстве материалы, в частности полученные в настоящей работе образцы теплоизоляционных материалов, являясь неоднородными по составу и представляют собой композиты (состоящие из двух и более материалов с различными диэлектрическими свойствами). Для описания их диэлектрических свойств необходимо применять модель эффективной среды [7] и учитывать влияние рассеяния излучения на неоднородностях. Применение стандартной обработки первичных данных терагерцовой спектроскопии (т. е. принимая среду однородной и характеризуемой интегральными параметрами) также дает много полезной информации как для разработки методов контроля для внелабораторного применения, так и непосредственно для разработки строительных материалов и технологии их получения.

В настоящей работе исследовались образцы теплоизоляционных материалов на основе отходов целлюлозно-бумажной промышленности. В качестве бумажного наполнителя использовались отходы гофрированного картона марки МС-5Б. Неорганическими вяжущими служили быстротвердеющий цемент марки М-500 (ЦЕМ 47,5). В качестве полимерных связующих применяли элементарную серу, полиэтилентерефталат, модифицированный цементом с добавкой наноразмерного оксида кремния, полиуретан (МПУ).

Бумажный наполнитель вводили в вяжущее неорганической природы (цемент, гипс), перемешивали до однородной массы и формировали образцы – кубики размером  $(2 \times 2 \times 2) 10^{-3}$  м. Через 7 сут твердения образцы подвергались испытанию на прочность, водостойкость и водопоглощение. Прочность при сжатии определяли на гидравлическом прессе типа ВНИР на стандартных образцах, водопоглощение, водостойкость (коэффициент размягчения), коэффициент теплопроводности – по стандартными методикам. Коэффициент конструктивного качества (ККК) определяли как отношение прочности на сжатие к плотности материала.

Результаты испытаний исследуемых образцов представлены в таблице.

## Результаты испытаний исследуемых образцов

## Examples of test results

Тип связующего. Состав: БН:СВ, масс. %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа	Водопо- глощение, %	Коэффици- ент водо- стойкости	ККК·10 <sup>4</sup> , см
Цемент (10:90)	1,31	8,1	18,0	0,62	6,2
Цемент (10:90) поризованный	0,91	6,8	38,0	0,48	7,5
Элементарная сера (30:70)	1,73	34,8	3,2	0,99	20,1
Полиэтилентерефта- лат (30:70)	1,32	21,4	0,5	0,98	16,2
МПУ (30:70)	0,37	11,0	0,5	0,97	29,7
МПУ (30:70) прессованный образец	0,42	14,0	0,4	0,98	33,3

Измерения проводились на импульсном терагерцовом спектрометре, оснащённом двумя линиями задержки, терагерцовым эмиттером и приемником в виде фотопроводящих дипольных антенн на основе LT-GaAs.

На рис. 1–5 показаны временные формы опорных импульсов: без образца на пути терагерцовых импульсов – панели *a* и прошедших образец – панели *b*, а также частотные формы этих импульсов, полученные из временных форм с помощью преобразования Фурье (панели *б* и *в* соответственно).

Из сравнения спектров, представленных на панелях *б* и *в* (рис. 2–5), можно отметить сильное поглощение терагерцового излучения, особенно в области частот выше 1–2 ТГц. Это говорит о том, что для построения изображений, или реализации терагерцовой томографии подобных образцов, необходимо применять частоты в диапазоне 50–450 ГГц. Это соответствует данным, полученным в работах [9, 10, 11, 12, 13]. Модуляция временных форм на частоте 1,83 ТГц (и ее второй гармонике 3,67 ТГц), которая явно видна на рис. 2–5, панели *в* и *з*, является эффектом измерительной схемы и не является характеристикой материала.

В образце № 1 (рис. 2, *в*) заметно небольшое прохождение терагерцового импульса практически без задержки. Наблюдаются максимумы на временных формах опорного сигнала и импульса, прошедшего образец, при одном значении  $t = 22$  пс (рис. 2, *a*, *в*), что говорит о том, что в образце имеются пустоты. Образец № 1 является наименее плотным среди измеренных. Сигнал, прошедший образец, содержит спектральные компоненты с амплитудами, превышающими уровень шума, до частоты около 2 ТГц (рис. 2, *з*). Максимальное пропускание наблюдается на частоте вблизи 170 ГГц (рис. 2, *з*), тогда как максимум спектральной интенсивности опорного сигнала находится на частоте 420 ГГц (рис. 2, *б*). Для упрощенной оценки значения показателя преломления можно воспользоваться формулой  $n = \Delta t \cdot c/d + 1$ , где  $\Delta t$  – временная задержка между импульсами, прошедшими образец, и воздушный зазор той же толщины  $d$  (разность значений  $t$ , при которых наблюдается максимальная по модулю напряженность поля терагерцового сигнала на рис. 2, *a* и *в*),  $c$  – скорость света в вакууме. Для образца № 1 рассчитанный таким образом показатель преломления  $n = 1,28$ .

№ 1,  $d = 16370$  мкм№ 2,  $d = 16970$  мкм№ 3,  $d = 20250$  мкм№ 4,  $d = 19970$  мкм

Рис. 1. Фотографии экспериментальных образцов и их толщины  
Fig. 1. Photographs of experimental samples with different thicknesses

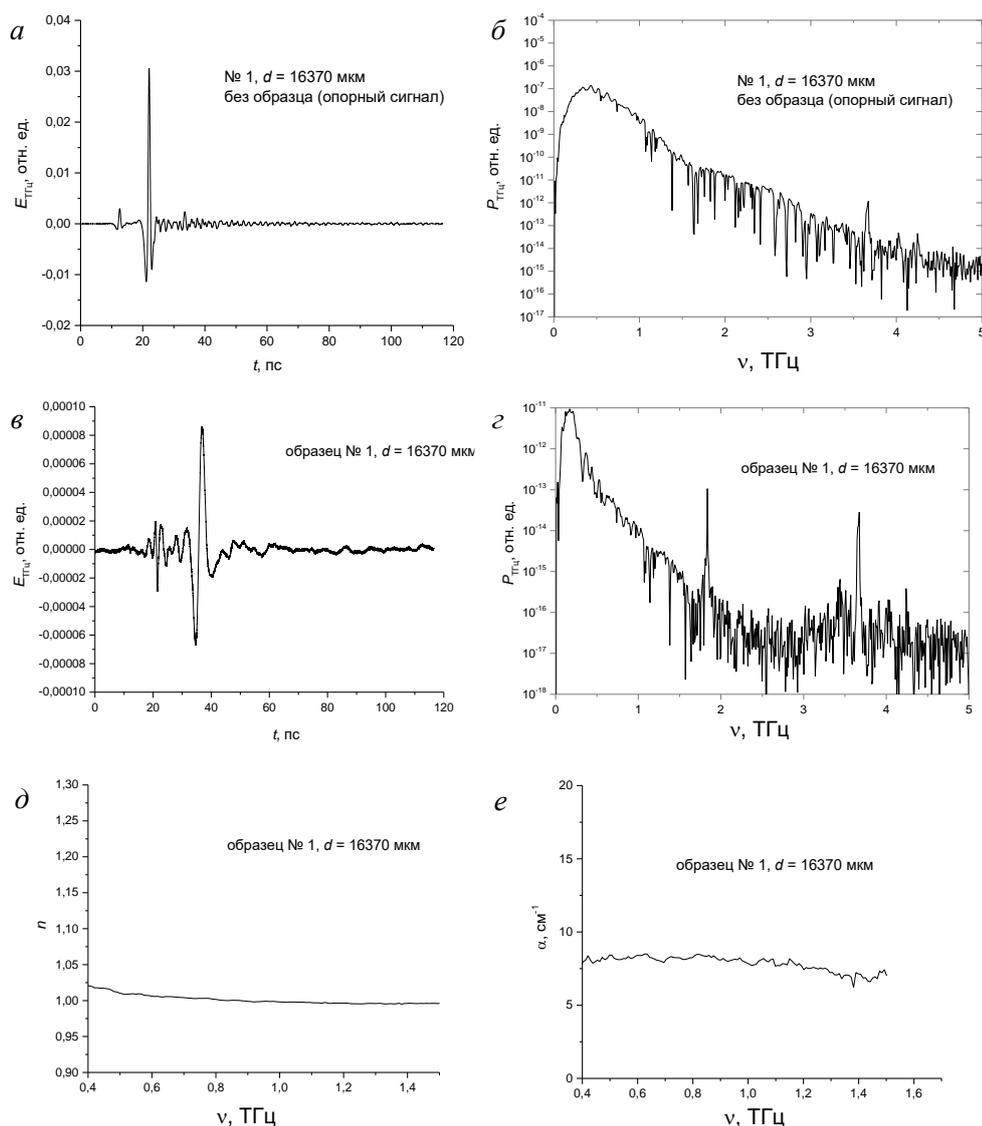


Рис. 2. Временные (а) и частотные формы опорного сигнала (б) и сигнала, прошедшего образец № 1 (в, г), а также рассчитанные спектральные зависимости интегрального показателя преломления (д) и коэффициента поглощения по интенсивности (е)

Fig. 2. Time (a) and frequency (b) curves of reference signal and signal passed through sample 1 (c) and calculated spectral dependences of the integral refractive index (d) and absorption coefficient (e)

Спектр показателя преломления, полученный при стандартном анализе данных импульсной терагерцовой спектроскопии при использовании оконной функции Блэкмана [5], но без учета неоднородности образца, показан на рис. 2, д. В настоящей работе для расчетов использовалась специализированная программа TeraLyzer (LyTera, Германия) [14]. Аналогично с использованием упрощенной формулы для расчета усредненного по частотам коэффициента погло-

щения  $\alpha = -\ln(E/E_0)^2/d$ , где  $E$  и  $E_0$  – максимальная по модулю напряженность поля терагерцового сигнала для импульса, прошедшего через образец, и опорного импульса соответственно (рис. 2, а и в), можно получить значение  $\alpha = 21 \text{ см}^{-1}$ . Рассчитанный в рамках более строгого подхода спектр показателя преломления представлен на рис. 2, е.

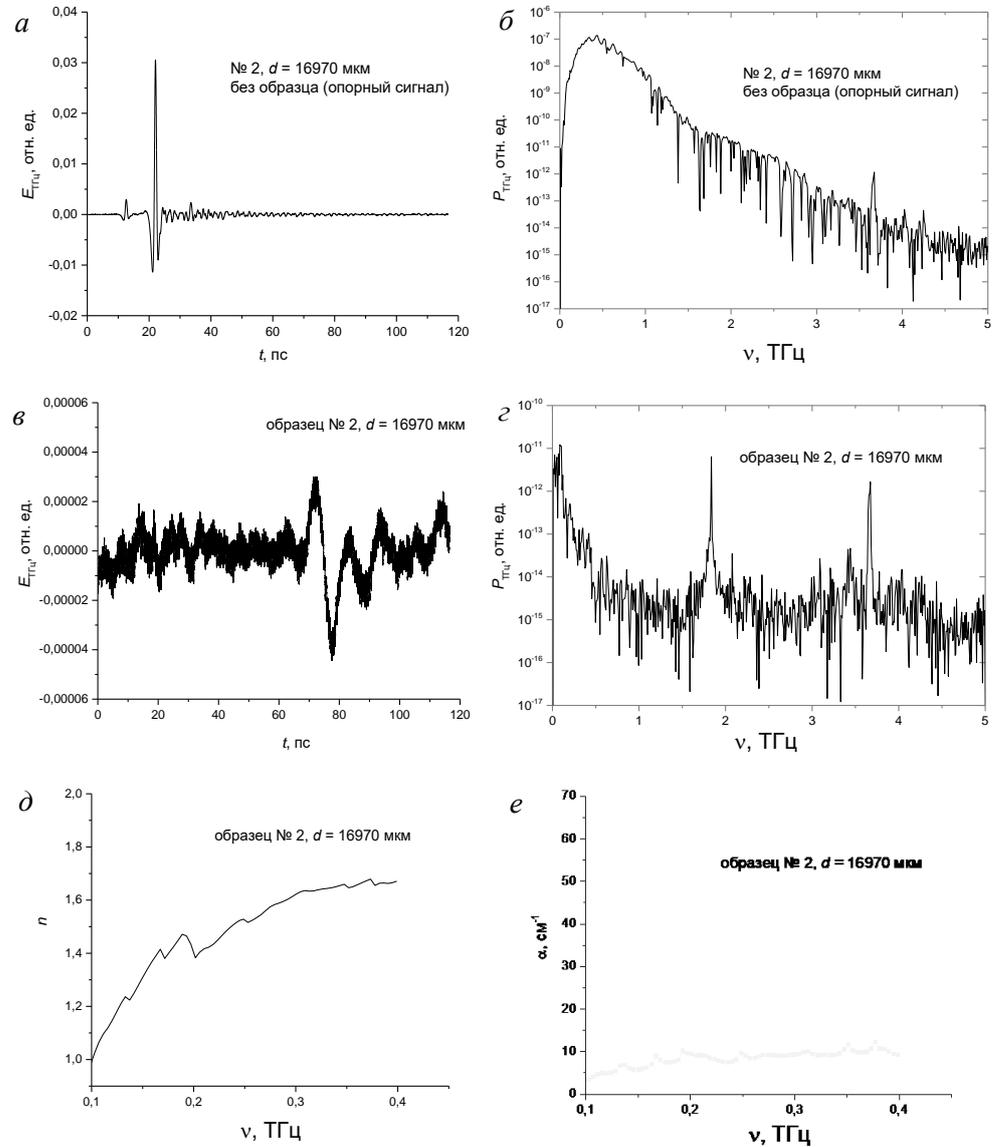


Рис. 3. Временные (а) и частотные формы опорного сигнала (б) и сигнала, прошедшего образец № 2 (в, г), а также рассчитанные спектральные зависимости интегрального показателя преломления (д) и коэффициента поглощения по интенсивности (е)

Fig. 3. Time (a) and frequency (b) curves of reference signal and signal passed through sample 2 (c, d) and calculated spectral dependences of the integral refractive index (e) and absorption coefficient (f)

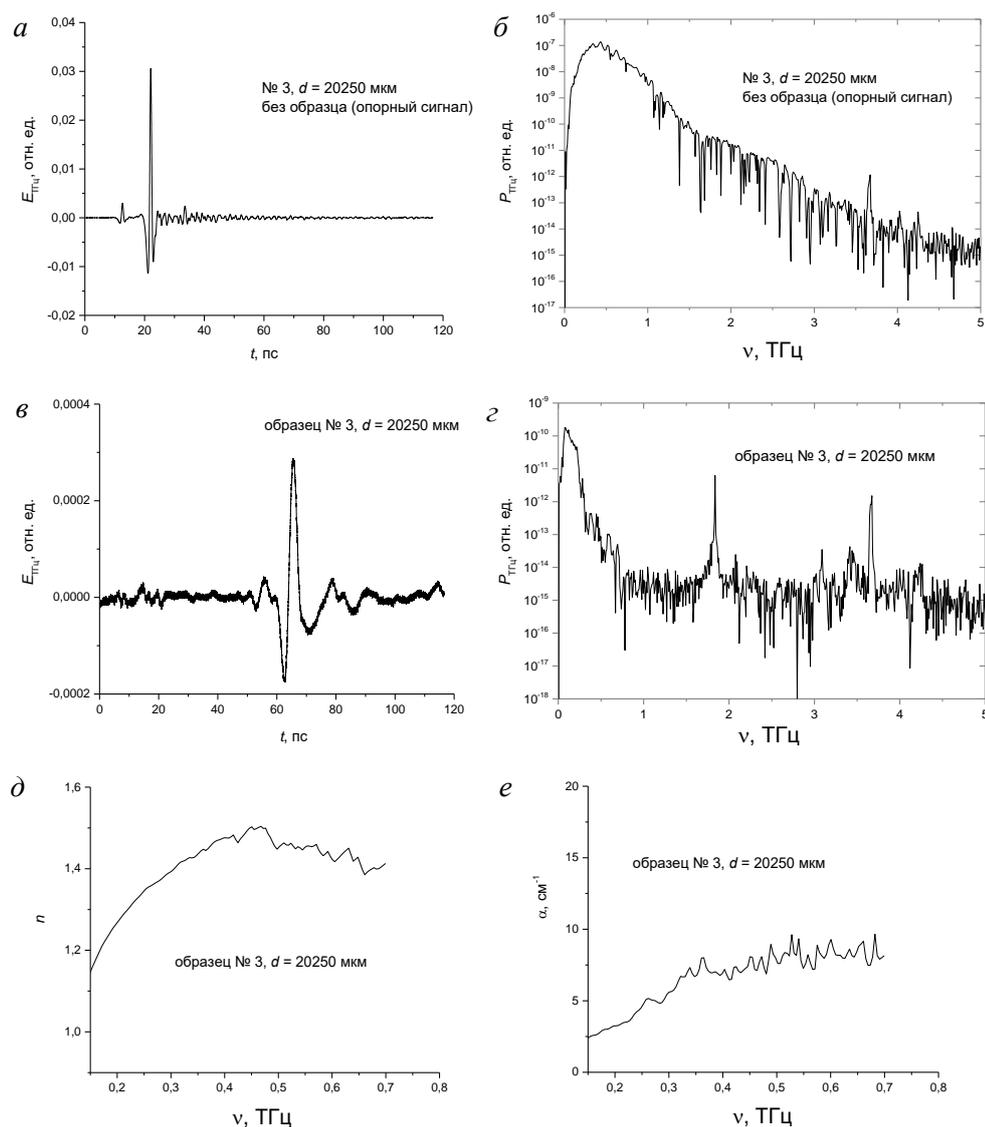


Рис. 4. Временные (а) и частотные формы опорного сигнала (б) и сигнала, прошедшего образец № 3 (в, г), а также рассчитанные спектральные зависимости интегрального показателя преломления (д) и коэффициента поглощения по интенсивности (е)

Fig. 4. Time (a) and frequency (b) curves of reference signal and signal passed through sample 3 (c, d) and calculated spectral dependences of the integral refractive index (e) and absorption coefficient (f)

Для образца № 2 (рис. 3) ослабление терагерцового сигнала становится более сильным. Сигнал, прошедший образец, содержит спектральные компоненты с амплитудами, превышающими уровень шума, до частоты около 450 ГГц (рис. 3, г), а максимальное пропускание наблюдается на частоте вблизи 90 ГГц (рис. 3, г). Упрощенные оценки, как описано выше, дают значения показателя преломления  $n = 1,88$  и коэффициента поглощения  $\alpha = 27 \text{ см}^{-1}$ . Рассчи-

танные в рамках более строгого подхода [5, 14] спектры показателя преломления и коэффициента поглощения приведены на рис. 3, д и е соответственно.

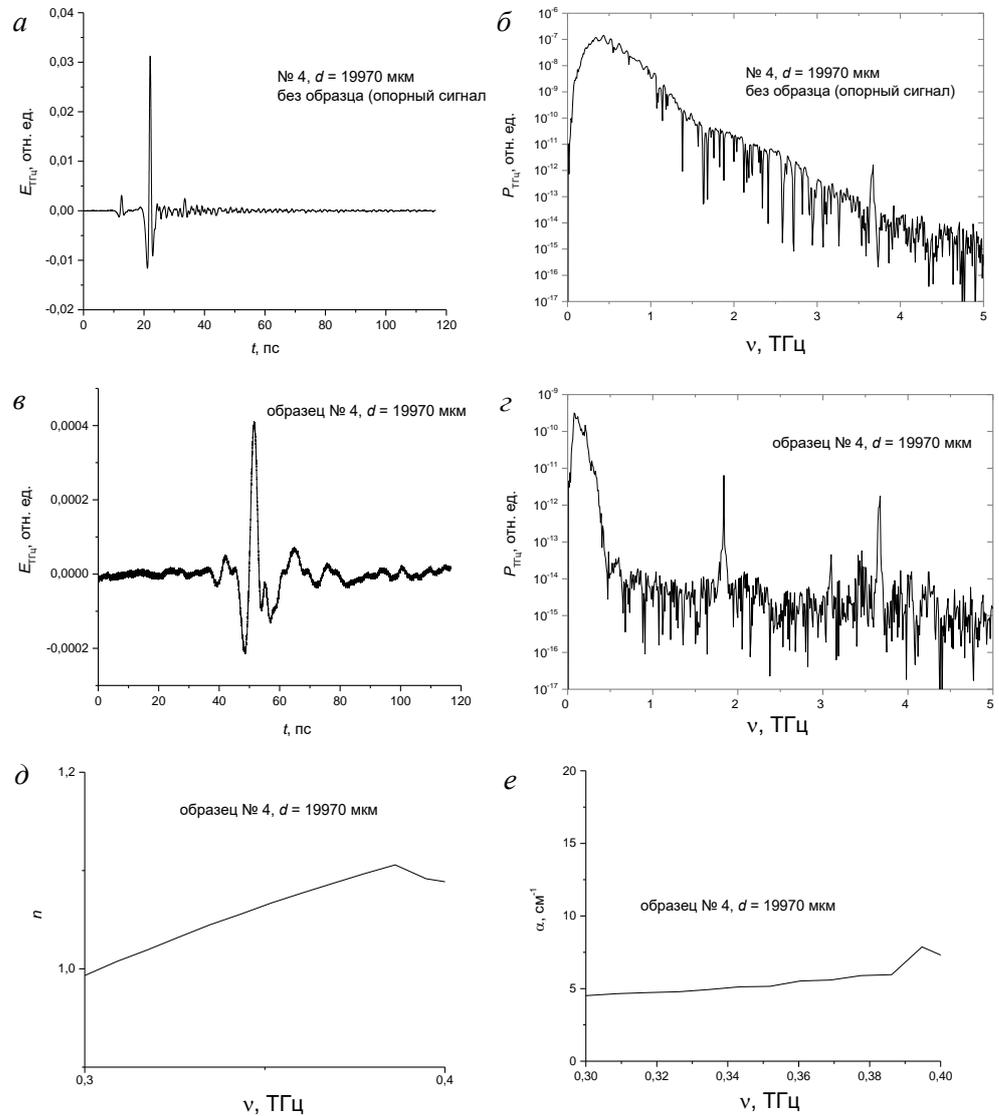


Рис. 5. Временные (а) и частотные формы опорного сигнала (б) и сигнала, прошедшего образец № 4 (в, г), а также рассчитанные спектральные зависимости интегрального показателя преломления (д) и коэффициента поглощения по интенсивности (е)

Fig. 5. Time (a) and frequency (b) curves of reference signal and signal passed through sample 4 (c, d) and calculated spectral dependences of the integral refractive index (e) and absorption coefficient (f)

Аналогично в образце № 3 сигнал, прошедший образец, содержит спектральные компоненты с амплитудами, превышающими уровень шума, до частоты около 720 ГГц (рис. 4, з), а максимальное пропускание, как и для образца

№ 2, наблюдается на частоте вблизи 90 ГГц (рис. 4, *з*). Упрощенные оценки, как описано выше, дают значения показателя преломления  $n = 1,64$  и коэффициента поглощения  $\alpha = 11 \text{ см}^{-1}$ . Рассчитанные в рамках более строгого подхода спектры показателя преломления и коэффициента поглощения показаны на рис. 4, *д* и *е* соответственно.

Для образца № 4 сигнал, прошедший образец, содержит спектральные компоненты с амплитудами, превышающими уровень шума, до частоты около 450 ГГц (рис. 5, *з*), а максимальное пропускание, как и для образца № 2, наблюдается на частоте вблизи 80 ГГц (рис. 5, *з*). Упрощенные оценки, как описано выше, дают значения показателя преломления  $n = 1,45$  и коэффициента поглощения  $\alpha = 9 \text{ см}^{-1}$ .

Принимая во внимание полученные в настоящей работе данные, в частности, можно ожидать, что среди исследованных образцов теплоизоляционных материалов наименьшей теплопроводностью будет обладать состав № 4, а наибольшей – состав № 2. Такой качественный вывод может следовать из существующей корреляции между величинами теплопроводности и коэффициентов поглощения. Существование такой корреляции согласуется с экспериментальными данными.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Monte M. C., Fuente E., Blanco A., Negro C. Waste management from pulp and paper production in the European Union // Review Waste Manag. 2009. P. 293–308. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.002>
2. Эковата – утеплитель из бумаги. Особенности, характеристики и свойства. URL: <https://ekovata-msk.ru/stati/ekovata-uteplitel-iz-bumagi/> (дата обращения: 17.06.2024).
3. Bang J., Choi H.Y., Ahn K.-S., Yeo H., Oh J.-K., Kwak H.W. Sustainable cellulose nanofiber/hydrophobic silica nanoparticle coatings with robust hydrophobic and water-resistant properties for wood substrates // Appl. Surf. Sci. 2024. V. 654. 159419. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apusc.2024.159419>
4. Kunam P.K., Anushikha, Gaikwad K.K. Water resistant paper based on natural rubber latex from Hevea brasiliensis andbutyl stearate hydrophobic coating for packaging applications // Industrial Crops and Products. 2023. V. 205. 117480. URL: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117480>
5. Иванова Н.В. Математическая обработка ИК-спектра // Журнал прикладной спектроскопии. 1989. 51. № 2. С. 301–306.
6. Moghadam S.G., Momen G., Bakhshandeh E., Jafari R. To be or not to be a hydrophobic matrix? The role of coating hydrophobicity on anti-icing behavior and ions mobility of ionic liquids // Chemical Engineering Journal. 2024. V. 485. 149696. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149696>
7. Варено Л.Г. Исследование свойств бумаги методом ИК-спектроскопии // Фундаментальные исследования. 2007. Т. 12. С. 463–464. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=4369> (дата обращения: 29.04.2024).
8. Ешбаева У.Ж., Джалилов А.А. ИК-спектроскопические исследования свойств бумаг со связующими полимерами // Universum: технические науки. 2022. № 1 (94). URL: <https://doi.org/10.32743/UniTech.2022.94.1.12936> (дата обращения: 08.06.2024).
9. Михалева М.Г. Суперспирализованные анизометрические фазы в системах биомиметиков и целлюлозе : специальность 03.01.02 : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Москва, 2017. 135 с.
10. Grunin Y.B., Grunin L.Yu., Schiraya V.Yu., Ivanova M.S., Masas D.S. Cellulose–water system’s state analysis by protonnuclear magnetic resonance and sorption measurements // Bioresources and Bioprocessing. 2020. V. 7. № 1. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1186/s40643-020-00332-8>
11. Abina A., Puc U., Jeglič A., Zidanšek A. Applications of terahertz spectroscopy in the field of construction and buildingmaterials // Appl. Spectrosc. Rev. 2014. V. 50. № 4. P. 279–303.

12. Abina A., Puc U., Jeglič A., Zidanšek A. Structural characterization of thermal building insulation materials using terahertz spectroscopy and terahertz pulsed imaging // *NDT & E Int.* 2016. V. 77. P. 11–18. DOI:10.1016/j.ndteint.2015.09.004
13. Jepsen P.U., Cooke D.G., Koch M. Terahertz spectroscopy and imaging – Modern techniques and applications // *Las. Phot.Rev.* 2011. V. 5. № 1. P. 124–166. URL: <https://doi.org/10.1002/lpor.201200505>
14. Yang Y., Wu T.V., Sempey A., Pradere C., Sommier A., Batsale J.-C. Combination of terahertz radiation method and thermal probe method for non-destructive thermal diagnosis of thick building walls // *Energy Build.* 2018. V. 158. P. 1328–1336. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.029>

## REFERENCES

1. Monte M.C., Fuente E., Blanco A., Negro C. Waste Management from Pulp and Paper Production in the European Union. *Waste Management.* 2009; 29 (1): 293–308. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.002>
2. Ecowool – insulation made of paper. Features, characteristics and properties Available: <https://ekovata-msk.ru/stati/ekovata-uteplitel-iz-bumagi/> (accessed June 17, 2024).
3. Bang J., Choi H.Y., Ahn K.-S., Yeo H., Oh J.-K., Kwak H.W. Sustainable Cellulose Nanofiber/Hydrophobic Silica Nanoparticle Coatings with Robust Hydrophobic and Water-Resistant Properties for Wood Substrates. *Applications of Surface Science.* 2024; 654: 159419. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.159419>
4. Kunam P.K., Anushikha, Gaikwad K.K. Water Resistant Paper Based on Natural Rubber Latex from Hevea Brasiliensis and Butyl Stearate Hydrophobic Coating for Packaging Applications. *Industrial Crops and Products.* 2023; 205: 117480. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117480>
5. Ivanova N.V. Mathematical Processing of IR Spectrum. *Journal of Applied Spectroscopy.* 1989; 51 (2): 301–306.
6. Moghadam S.G., Momen G., Bakhshandeh E., Jafari R. To Be or Not to Be a Hydrophobic Matrix? The Role of Coating Hydrophobicity on Anti-Icing Behavior and Ions Mobility of Ionic Liquids. *Chemical Engineering Journal.* 2024; 485: 149696. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149696>
7. Varepo L.G. Study of Paper Properties by IR Spectroscopy. *Fundamental'nye issledovaniya.* 2007; 12: 463–464. (In Russian)
8. Eshbaeva U.Zh., Dzhalilov A.A. IR Spectroscopic Studies of the Properties of Papers with Polymer Binders. *Universum: tekhnicheskie nauki.* 2022; (94) 1. (In Russian)
9. Mikhaleva M.G. Supercoiled Anisometric Phases in Biomimetic Systems and Cellulose. PhD Thesis. Moscow. 2017. 135. 16 p. (In Russian)
10. Grunin Y.B., Grunin L.Yu., Schiraya V.Yu., Ivanova M.S., Masas D.S. Cellulose Water System's State Analysis by Proton Nuclear Magnetic Resonance and Sorption Measurements. *Bioresources and Bioprocessing.* 2020; 7 (1): 1–11. <https://doi.org/10.1186/s40643-020-00332-8>. (In Russian)
11. Abina A., Puc U., Jeglič A., Zidanšek A. Applications of Terahertz Spectroscopy in the Field of Construction and Building Materials. *Applied Spectroscopy Reviews.* 2014. 50 (4): 279–303.
12. Abina A., Puc U., Jeglič A., Zidanšek A. Structural Characterization of Thermal Building Insulation Materials using Terahertz Spectroscopy and Terahertz Pulsed Imaging. *NDT&E International.* 2016; 77: 11–18. DOI:10.1016/j.ndteint.2015.09.004
13. Jepsen P.U., Cooke D.G., Koch M. Terahertz Spectroscopy and Imaging—Modern Techniques and Applications. *Laser and Photonics Reviews.* 2011. 5 (1): 124–166. <https://doi.org/10.1002/lpor.201200505>
14. Yang Y., Wu T.V., Sempey A., Pradere C., Sommier A., Batsale J.-C. Combination of Terahertz Radiation Method and Thermal Probe Method for Non-Destructive Thermal Diagnosis of Thick Building Walls. *Energy and Buildings.* 2018. 158: 1328–1336. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.029>

## Сведения об авторах

Саркисов Юрий Сергеевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sarkisov@tsuab.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9439-1994>

*Горленко Николай Петрович*, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, gorlen52@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6237-4353>

*Саркисов Дмитрий Юрьевич*, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, milandd@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3657-2273>

*Зубкова Ольга Александровна*, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, zubkova0506@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3621-3836>

#### Authors Details

*Yuriy S. Sarkisov*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, sarkisov@tsuab.ru

*Nikolay P. Gorlenko*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, gorlen52@mail.ru

*Dmitry Y. Sarkisov*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, milandd@yandex.ru

*Olga A. Zubkova*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, zubkova0506@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 29.09.2024  
Одобрена после рецензирования 17.10.2024  
Принята к публикации 31.10.2024

Submitted for publication 29.09.2024  
Approved after review 17.10.2024  
Accepted for publication 31.10.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 6. С. 146–159.

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 (6): 146–159.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 553.2 +691.4

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-146-159

EDN: PQEUNZ

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧАСТИЕМ НАНОАРМИРУЮЩЕГО И МОДИФИЦИРУЮЩЕГО ВОЛЛАСТОНИТА

**Анатолий Васильевич Мананков, Ирина Анатольевна Рахманова,  
Валерий Михайлович Владимиров**

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

**Аннотация.** *Актуальность.* Развитие цивилизации требует постоянного поиска решений для создания новых функциональных материалов, способных удовлетворить возрастающие потребности общества. В настоящей работе представлены подходы к снижению энергозатратности, металлоемкости и повышению качества функциональных материалов посредством использования современных композиционных материалов, включающих модифицирующие и наноармированные добавки на основе волластонита. Уникальные свойства волластонита обусловлены его тонкой игольчатой структурой, высоким уровнем белизны и особым химическим составом, что делает этот материал перспективным для применения в различных отраслях промышленности.

Для успешного участия в процессе модернизации машиностроительных и строительных отраслей предлагается использовать научные достижения томских университетов в сфере экспериментальной и технической минералогии, а также материаловедения.

**Результаты.** Разработан метод синтеза синтетического волластонита с заданными характеристиками. Многочисленные эксперименты подтвердили превосходство волластонита над традиционными материалами, используемыми в таких областях, как производство красок, бумаги, для создания стоматологических и хирургических материалов, керамики, глазурей, ангобов и т. д.

**Ключевые слова:** игольчатые модификации волластонита, трансволластонит, функциональные композиционные материалы, периодическо-ритмическая цикличность, экономика, материаловедение, экспериментальная и техническая минералогия

**Для цитирования:** Мананков А.В., Рахманова И.А., Владимиров В.М. Возможности применения композиционных материалов с участием наноармирующего и модифицирующего волластонита // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 146–159. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-146-159. EDN: PQEUNZ

## ORIGINAL ARTICLE

**PROSPECTS OF COMPOSITE MATERIALS WITH NANOREINFORCING AND MODIFYING WOLLASTONITE****Anatoly V. Manankov, Irina A. Rakhmanova, Valery M. Vladimirov***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

**Abstract.** A completion of the industrial stage in many industries began late in the 20th century. Measures to reduce the energy and metal consumption and improve the quality of functional materials by attracting new functional composite materials with the addition of modifying and nanoreinforcing filler wollastonite are discussed herein. The main directions of wollastonite use are determined rather by acicular crystals and their color (up to finely white) and chemical composition. In order for the country to participate in the inevitable modernization of mechanical engineering, construction industry and entire economy, it is proposed to study the experience of foreign countries, primarily such as Japan, and begin to implement scientific results obtained in Tomsk universities in the field of experimental and technical mineralogy and materials science.

**Research findings:** A large deposit of natural wollastonite is discovered in the host metasomatic formations of a gold ore deposit in the Altai Mountains. Methods for obtaining synthetic acicular wollastonite are created. Numerous studies show advantages of wollastonite and its merits in comparison with other traditional materials used in many composite materials, ranging from paints, paper, dental, surgical materials, ceramics, glazes and others.

**Keywords:** acicular wollastonite, transwollastonite, composite material, periodic-rhythmic cycle, economics, materials science, experimental and technical mineralogy

**For citation:** Manankov A.V., Rakhmanova I.A., Vladimirov V.M. Prospects of Composite Materials with Nanoreinforcing and Modifying Wollastonite. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (6): 146–159. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-146-159. EDN: PQEUNZ

**Введение**

Периодическо-ритмическая цикличность экономического развития основана на привлечении научных достижений, включая прорывные достижения фундаментальных и прикладных исследований в области материаловедения и технической минералогии, обеспечивающих качественное совершенствование, даже рывок технологического уровня. Исторически временные интервалы этих циклов постепенно сокращаются: от эпох и веков (палеолит, неолит, каменный век, бронзовый и железный века) до более коротких промежутков времени в XX в. В этот период потребление природных ресурсов, объемы промышленных отходов и численность населения планеты росли экспоненциально. Параллельно с этим в промышленное производство вовлекалось всё больше видов полезных ископаемых. Если в начале XX в. использовалось 52 химических элемента из 84 известных тогда, то к 1917 г. их число увеличилось до 64 из 85, к 1937 г. – до 73 из 89, к 1975 г. – до 87 из 104, а в 1990-х гг. все 104 элемента получили производственное применение. Этот экспоненциальный экономический рост выявил дефицит природных ресурсов и обострил проблемы материаловедения, затронув практически все отрасли промышленности.

Внедрение автоматизированных и высокоскоростных производственных линий потребовало значительного изменения традиционных рецептур, ускоре-

ния физико-химических процессов и адаптации к новым технологиям. Так, введение 20 % волластонита в традиционную рецептуру керамических плиток на отечественных конвейерных линиях позволило существенно улучшить свойства продукции по деформируемости, усадке (в два раза), в 1,5 раза уменьшить водопоглощение, значительно увеличить термостойкость, в 2,5 раза повысить прочность на изгиб, в 2 раза увеличить морозостойкость и прочность сцепления с глазурью и снизить температуру обжига. Аналогичные тенденции наблюдаются и при использовании других материалов.

Важно отметить роль игольчатой формы минерала для асбоцементной и строительной промышленности. Цемент с добавкой волластонита, в отличие от цемента с инертными материалами (диатомит, опок, трепел), является безусадочным, воздухо- и атмосферо-морозостойким, нормально твердеющим при гидротермальной обработке. Волластонит не генерирует коллоидных гидросиликатов. Цементно-волластонитовые вяжущие используются для изготовления коррозионноустойчивых и экономически эффективных бетонов с высокими механическими свойствами [2].

Применение волластонитового порошка в процессе производства бумаги может значительно повысить экономическую эффективность. Замена одной тонны традиционного древесного сырья на ультрадисперсный порошок волластонита позволяет сократить потребление древесины до 3,6 м<sup>3</sup> и уменьшить производственные расходы на более чем 4000 руб. по сравнению с использованием обычной целлюлозы.

Волластонит с игольчатым габитусом в лакокрасочной промышленности действует как выравнивающий агент в покрытиях, улучшает механическую прочность пленки покрытия, укрывистость покрытия и заменяет вредный асбест в армированных покрытиях. Волластонит с обработанной поверхностью может использоваться в промышленных алкидных, эпоксидных и других антикоррозионных покрытиях для повышения коррозионной стойкости металлических грунтовок и частичной замены активных антикоррозионных пигментов. Это позволяет рассматривать возможность применения волластонита в качестве альтернативы импортным материалам, например, для разметки пешеходных переходов на асфальтовых покрытиях [1].

### Синтез волластонита игольчатой формы

Волластонит как промышленный минерал по достоинству впервые был оценен в США в 40-х гг. XX в. В качестве продукта расплавной технологии по своим физическим свойствам он весьма близок природному.

**Кристаллохимические свойства.** Игольчатый низкотемпературный полиморф β-волластонит, как и природный, имеет триклинную структуру из бесконечных силикатных цепочек. В состав его элементарной ячейки входят три тетраэдра, вытянутых вдоль оси *у*, как это было впервые установлено академиком Н.В. Беловым [5]. Катионы Ca<sup>2+</sup> и его изоморфные примеси Fe<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup> располагаются в искаженных октаэдрах, находясь в одной плоскости с четырьмя ближайшими атомами кислорода. Поэтому синтетический β-волластонит формирует игольчатые, пластинчатые агрегаты со значительным удлинением.

На основе одного и того же исходного состава, но при разных кинетических параметрах или технологических условиях могут быть получены разные полиморфные модификации волластонита при определенных значениях вязкости расплавленной и переохлажденной системы, что в целом хорошо согласуется с диаграммами состояния систем  $\text{CaO} - \text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O}$ . По данным изучения **высокотемпературной вязкости** охлаждающегося расплава, от состояния гомогенности в интервале 1400–1250 °С происходит в целом медленное, но заметно ускоряющееся нарастание вязкости. Переходная область – интервал 1250–1200 °С, а затем происходит быстрое увеличение вязкости от 10 до 50–80 П.

В рамках **полимерной модели строения расплава** энергия активации вязкого течения  $E\eta$  должна определяться в основном тремя составляющими: 1) энергией разрыва мостиковых связей Si–O в анионных комплексах; 2) энергией разрыва связей немостиковых атомов кислорода с катионами-модификаторами; 3) энергией разрыва связей свободных атомов кислорода с катионами-модификаторами. В действительности процесс гораздо сложнее. Так, влияние химического состава на вязкость расплава может полностью компенсироваться влиянием активности кислорода. Поэтому по абсолютным значениям вязкость у разных составов различна при одинаковой температуре. То есть системы различаются между собой сложностью структурных единиц вязкого течения и их размерами. Менее сложные и более короткие комплексы более подвижны, что обуславливает уменьшение динамической вязкости при неизменной температуре.

К настоящему времени за счет постоянного расширения сфер использования общий годовой объем производства достигает 300 тыс. т, более одной трети составляет синтетический волластонит. Последний представлен рядом модификаций, однако на рынке преобладает игольчатый  $\beta$ -волластонит, обладающий рядом преимуществ перед природным минералом. Главные из них – игольчатая форма кристаллов, высокая степень чистоты, отсутствие включений других фаз, однородность химического состава, реально достижимая низкая стоимость. Результаты исследований подтверждены авторскими свидетельствами и патентами на изобретения (А. с. № 1011514; 1176564; 1331827; 1552560; 1625837; 1705250; 1705741; патенты № 2108069; 2109493; 2181105). На мировом рынке тонкодисперсный волластонит представлен восемью сортами. Значительная часть производимого тонкодисперсного волластонита экспортируется в страны Западной Европы и Японию. Он широко используется в США, Китае и других странах как конструктивный минерал в производстве специальной радиокерамики, фаянса, фарфора, изоляторов с низкими диэлектрическими потерями, санитарных изделий, облицовочных кирпичей, специальных цементов для керамики, абразивов, стекла, шин, кабельных резин, бумаги и разнообразных композитов [3, 5–9].

С 1970-х гг. в Томском государственном университете под руководством профессора И.К. Баженова была инициирована программа «Комплексное использование природных ресурсов». В ходе экспериментальных исследований в лабораторных условиях было доказано, что минерал из группы метасиликатов кальция  $\text{Ca}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ , обладающий триклинной сингонией, способен существенно улучшать свойства различных композитных материалов. В отличие от других метасиликатов, процесс синтеза этого минерала требует особого контроля, по-

скольку необходимо обеспечить доминирование стабильной  $\beta$ -модификации ( $\beta$ -волластонита), исключив при этом образование метастабильных фаз.

Изучение продуктов экспериментов по кинетике фазовых превращений при кристаллизации волластонита и их анализ позволили обнаружить доминирующую роль низкоэнергетических взаимодействий при фазовых переходах и установить, что именно они в неравновесных условиях во многом управляют эволюцией системы. Причиной низкоэнергетических взаимодействий являются градиентные поля, возникающие под действием механических, термомеханических, электрических и магнитных напряжений, сил поверхностного натяжения, нуклеаторов и т. п. Несмотря на различную природу градиентных полей, механизмы кристаллизации волластонита имеют достаточно общий характер. Они заключаются в том, что кристаллизация силикатных расплавов и растворов в нестационарных и стационарных условиях определяется в значительной мере не транспортными процессами, а механизмом поляризационной трансляции молекул и молекулярных агрегатов континуума внешними и самоиндуцированными силовыми полями. Ориентация поляризованных молекул и их агрегатов предшествует образованию кристаллической решетки в тех ситуациях, когда она соответствует их ориентации в решетке [10]. При достижении этих условий понижаются энергии, необходимые для активации фазового перехода, на 2 порядка ускоряется сам процесс.

Была предложена концепция кватаронной модели зародышеобразования и роста кристаллов, основанная на кластерной самоорганизации вещества на наноуровне. Кватароны представляют собой наноструктуры, которые благодаря своей динамической структуре могут включаться в кристаллическую решётку практически без кинетических препятствий и деформаций самой решётки [11].

На основе эффекта поляризационной трансляции фазовых переходов мы получаем более целостное, концептуально ясное описание физико-химических процессов на наноуровне, необходимое для широкого практического использования в генетической, экспериментальной минералогии и материаловедении. Эти результаты самым серьезным образом необходимо развивать в новой науке наноминералогии и в материаловедении.

На этапе измельчения материала вместо обычных традиционных авторы применили специфический дезинтегратор Хинта, заказав его изготовление автору оригинальной конструкции в г. Таллине. Принцип работы данного устройства основан на раскалывании кристаллов, в отличие от обычного размола, применяемого в стандартных методах.

Триклинный полиморф волластонита природного и синтетического генезиса используется как экологически чистый наполнитель, заменяет асбест, диоксид титана, каолин, мел, тальк и др. Благодаря своим наноармированным свойствам, даже небольшие добавки волластонита способны увеличить прочность различных материалов на два порядка, снизить продолжительность технологического процесса и температуру термической обработки, повысить жаростойкость, химическую стойкость и износостойкость продукции, а также улучшить её электроизоляционные и диэлектрические характеристики.

Примеры наиболее масштабных достижений включают производство автомобильных и турбовентиляторных двигателей в Японии и США, термоза-

щитных покрытий для ракетно-космической техники (США, СССР), строительных материалов (Германия, Италия), высококачественной бумаги, в число которой входят офсетные сорта, чековая бумага, водяные знаки, огнестойкий картон (Финляндия) и многое другое.

### **Проблемы отраслей машиностроения и способы их преодоления**

В начале нового технологического цикла возникла необходимость замены металлов на лёгкие и прочные материалы. Алюминий, будучи одним из самых распространённых металлов в земной коре, благодаря своей лёгкости, механической прочности и устойчивости к воздействию атмосферных условий, воды, некоторых кислот и органических соединений, стал основой для создания летательных аппаратов. Этот металл нашёл широкое применение в самолётостроении, автомобилестроении, судостроении, строительстве железнодорожных вагонов, создании машин, разнообразных технических конструкций и оборудования. Однако сегодня активно разрабатываются более экономически выгодные и экологически безопасные конструкционные композиты, способные заменить алюминий.

Композитные материалы находят всё большее применение в авиационной отрасли. Использование новых материалов позволяет снизить вес конструкций, одновременно увеличивая их прочность, что положительно сказывается на лётно-технических характеристиках самолётов и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Внедрение этих материалов помогает минимизировать затраты на производство [1].

Автомобильная промышленность развитых стран на протяжении десятилетий уделяет особое внимание весу транспортных средств, т. к. он непосредственно влияет на динамику движения, расход топлива и экологию. По данным Министерства энергетики США, снижение веса транспортных средств на 10 % приводит к увеличению экономии топлива на 6–8 %. Повышение топливной эффективности и снижение веса являются основными факторами, вынуждающими производителей инвестировать в фундаментальные исследования и прикладную науку композитных материалов. Положения законодательства о выбросах в США и Европе вынудили производителей автомобилей ограничить уровень выхлопных газов выпускаемых автомобилей. Транспортные средства в европейском регионе начали адаптироваться к нормам Евро-6, другие регионы (Азиатско-Тихоокеанский сегмент, Индия) последовали этому примеру. Более высокие стандарты (которые предназначены для контроля выбросов), в свою очередь, зависят от веса транспортного средства, сгорания топлива и эффективности его использования [1].

Строгие правила и нормы в отношении выбросов играют огромную роль в Северной Америке и Европе. Законодательные органы издают протоколы, предусматривающие включение определенного процента композитных материалов при изготовлении автомобилей для уменьшения загрязнения. В легковых автомобилях наибольшая доля использования композитных материалов. В связи с увеличением корпоративных требований к средней экономии топлива и ужесточением требований к выбросам транспортных средств во всем мире

ождается, что рынок легковых автомобилей, где наибольшая доля использования композитных материалов, будет расти [1].

Триггером для автомобилестроения стало землетрясение 1923 г. в Японии. Природный катаклизм разрушил железнодорожные и трамвайные пути. Стране потребовались грузовики, автобусы и легковые машины. Изначально свои заводы недалеко от Токио построили американские компании «Форд» и «Дженерал моторс». В период Второй мировой войны производственные мощности были уничтожены бомбардировками. К 1950-м гг. большую часть предприятий удалось восстановить, и первый выпуск машин составил 30 000 ед. в год. Японское автомобилестроение получило развитие в 1960-х гг. в эпоху японского экономического чуда. Война в Корее (между Севером и Югом) глобально отразилась на японском автомобилестроении. Армия США заказывала для своих нужд огромные партии грузовых и легковых машин марок «Тойота», «Ниссан», «Исудзу». Вместе с объёмом росло и качество продукции. По окончании военных действий «японский станок» нарастил высокие производственные мощности. К 1980 г. «Нихон коку» обогнала Америку по количеству выпускаемых автомобилей, заняв первое место в мире. После топливного кризиса 1973–1974 гг. экономичные японские автомобили закрепились на американском рынке и продолжают на нём доминировать. Флагманские автоконцерны «Тойота», «Ниссан», «Хонда» и «Мазда» имеют сеть производственных мощностей в США и других уголках мира. Растущий спрос на экономичные автомобили, увеличение сегмента легких электромобилей и тенденция крупных автомобильных гигантов, таких как BMW и Nissan, к замене металлических деталей композитными волокнами открывают перспективы новых масштабов сотрудничества [1].

Анализ размера и доли рынка автомобильных композитов Японии (2024–2029 гг.) показывает, что он сегментирован по типу материала (термоактивный полимер, термопластичный полимер, углеродное волокно, игольчатый волластонит, стекловолокно) и применению (конструкционная сборка, компоненты силовой передачи, применение внутреннее, внешнее и др.) [1].

Общее развитие науки и тяжёлой промышленности сер. XX в. обусловило бурное развитие электроники, в связи с этим стремительно стала расти отрасль робототехники. В 2004 г. на долю Японии приходилось около 45 % функционирующих в мире промышленных роботов (в абсолютных цифрах: к концу 2004 г. в Японии было задействовано 356,5 тыс. промышленных роботов, на втором месте со значительным отрывом шли США – 122 тыс.). Япония занимает первое место в мире по экспорту промышленных роботов, ежегодно производя более 60 тыс. единиц, почти половина из которых вывозится за границу. Сейчас эта промышленность является одной из ведущих в стране и практически не имеет конкурентов в мире. Не менее востребованы роботы в быту. Уход за маломобильными и престарелыми людьми уже практикуется в автоматическом режиме. Создаются роботы, похожие на людей, которые способны выполнять функции социальных работников, могут быть полезны медицинской отрасли. Основными разработчиками и производителями роботов являются компании Sony, Honda, Toyota, Mitsubishi Electric, Panasonic, Kawasaki и Yamaha. Правительство принимает активное участие в развитии отрасли, предоставляя изобретателям льготные условия труда [1].

Успехи промышленности страны, лишенной природных ресурсов, расположенной на ограниченной территории островного архипелага, обусловлены развитием материаловедения и системным анализом социально-экономической динамики с использованием методов нормирования, моделирования и прогнозирования экологических последствий.

Японский автопром достиг лидирующих позиций благодаря планомерной работе инженеров, маркетологов и государства. Япония занимает второе место в мировом экспорте автомобилей, экспортируя свыше 3,1 млн ед. (по данным 2022 г.). Автомобили отличаются высоким качеством, привлекательным дизайном и надежностью, что поддерживается глобальными маркетинговыми кампаниями. Например, известны тесты на затопляемость автомобилей Toyota, которые подчеркивают их высокую надежность.

На начало XXI в. в автомобильной индустрии было задействовано около 8 млн чел. Одной из особенностей данного этапа стало создание сборочных предприятий японских компаний в странах Азии [1].

### Композитные материалы в машиностроении

В сфере машиностроения, особенно в производстве коммерческих самолетов, наблюдается революционный переход к использованию композитов. Этот материал обладает рядом преимуществ перед традиционными металлическими сплавами. Во-первых, композиты обладают высокой прочностью при значительно меньшем весе, что снижает расход топлива и затраты на перевозку пассажиров. Кроме того, они менее подвержены усталостным разрушениям, возникающим вследствие многократных циклов взлетов и посадок, что уменьшает количество необходимых проверок и увеличивает время эксплуатации воздушного судна, обеспечивая его рентабельность [12].

Композитный материал (КМ) – это материал, который состоит из прочных армирующих нановолокон или наноиглолок, соединенных с несколько более слабым материалом (матрицей). Основная роль арматуры заключается в обеспечении прочности, жесткости и других механических свойств композита. Матрица, или связующее, помогает поддерживать положение и ориентацию арматуры и является несколько более хрупкой. Матрица в композитах выполняет функцию непрерывной фазы, определяющей форму конструкции. В аэрокосмической отрасли применяются различные типы композитов, каждый из которых обладает специфическими свойствами и областью применения [1].

Впервые композиты были разработаны и стали использоваться в военных самолетах во время Второй мировой войны. В настоящее время они доминируют в частных самолетах и современных коммерческих самолетах в аэрокосмической промышленности. В зависимости от состава арматуры выделяется три наиболее распространенных типа композитов: КМ усилены стекловолокном, КМ усилены углеродным волокном и КМ усилены арамидным волокном. В каждом типе КМ есть подтипы, которые обеспечивают широкий спектр композитов. Fiberglass представляет собой армированный волокном полимер, изготовленный из пластиковой матрицы, армированной тонкими волокнами из стекла. Это легкий, чрезвычайно прочный материал. Хотя по прочностным свойствам материал немного уступает углеродному волокну, однако он менее жесткий, как правило,

гораздо менее хрупкий, а изготавливаемое на его основе сырье намного дешевле. Укрепленный углем полимер (углепластик) – это высокопрочный и легкий композит, содержащий углеродные волокна. Помимо них, в состав материала могут входить другие армирующие элементы, такие как волластонит, арамид, кевлар, тварон, а также алюминиевые или стеклянные волокна. Aramid fiber относится к типу прочных синтетических волокон. Он используется в аэрокосмической и военной областях, для изготовления бронежилетов и баллистических композитов, в велосипедных шинах и в качестве заменителя асбеста.

Ежегодно авиаракетостроительная отрасль увеличивает использование современных композитных материалов в конструкциях новых поколений воздушных судов. Если в 1950-е гг. доля композитов из стекловолокна в структуре пассажирского самолета Boeing 707 составляла лишь 2 %, то в Boeing 787 этот показатель достигает 50 % от конструктивного веса самолета. В Airbus A380 композиты занимают около 25 % общей массы планера [13].

Рост спроса на более легкие и экономичные воздушные суда создает значительные перспективы для производителей композитных компонентов в авиационно-космической отрасли на ближайшие 15 лет. Следует отметить, что применение композитных материалов в аэрокосмической промышленности пока находится на этапе исследования и необходимо дальнейшее улучшение производственных процессов для полного раскрытия потенциала рынка. Так, растущие требования потребителей стимулируют разработчиков стекловолоконных и волластонитовых материалов к внедрению более эффективных технологий производства. Композиционные материалы продолжают играть важную роль в создании аэрокосмических конструкций [1].

#### **Волластонит и композиты на его основе**

Производство  $\beta$ -волластонита начато в США в 40-х гг. XX в. В настоящее время годовой объем производства волластонита достигает 300 тыс. т, в том числе более одной трети составляет синтетический  $\beta$ -волластонит [7]. Значительная часть продукции экспортируется в Западную Европу и Японию [1].

Под руководством А.В. Мананкова в научно-исследовательской лаборатории кинетики минералообразования и кристаллофизики Томского государственного университета и в Томском государственном архитектурно-строительном университете с 1972 г. проводятся исследования природных и синтезированных искусственных  $\beta$ -волластонитов с использованием высокотемпературных петругических и гидротермальных золь-гельных методов. Было получено 19 различных составов. Основные характеристики  $\beta$ -волластонита включают волокнистую и игольчатую структуру с соотношением сторон до 30:1. Материал обладает высокой белизной (до 90 %), сопротивлением, низкой маслоёмкостью, низкой диэлектрической проницаемостью, термостойкостью, коррозионной стойкостью, устойчивостью к кислотам и щелочам, нетоксичностью, немагнитностью и низким коэффициентом теплового расширения. Он имеет характеристики малых потерь при возгорании и превосходные механические свойства, а также обладает определенным сродством с растительными волокнами. Принято ультратонкий порошок волластонита называть «минеральным волокном». Другие характеристики волластонита: нетоксичность, хорошая термическая ста-

бильность (1200–1540 °С), стеклянный и жемчужный блеск, отличные механические и электрические свойства, устойчивость к химической коррозии, хорошая стабильность размеров, низкая скорость абсорбции, а также определенный усиливающий эффект [1].

Вычисленные параметры кристаллической решетки обнаруживают некоторую зависимость от температуры кристаллизации в интервале 950–1150 °С. Выявлена новая полиморфная модификация волластонитового состава триклинной сингонии, которая получила название трансволластонит (Т-волластонит) [9]. Проведены опытно-заводские испытания в более чем 20 технологических процессах и различных функциональных и строительных материалах. Получены убедительные результаты в области модификации кабельных резин, автошин, полиэтилена, композитов для космического корабля «Буран», пластмасс, керамик и т. п. Результаты исследований подтверждены около 20 патентами на изобретения [3, 4, 14, 15].

В медицинскую практику внедрены патенты:

– № 2108069 «Способ получения материала для косного имплантата», приоритет 09.04.1996;

– патент № 2109493 «Зубной имплантат», приоритет 09.08.1996.

Получил внедрение патент № 2181105 от 10.04.2002 г. «Состав синтетического волластонита и способ его получения на основе промышленных отходов ОАО «Химпром», г. Волгограда [1].

Мировой спрос на волластонит удовлетворен только на 40–45 %. В связи с этим увеличивается производство синтетического волластонита. Его цена на мировом рынке составляет 800–900 долл. США за тонну, что приблизительно вдвое ниже рыночной стоимости природного волластонита, но более чем на порядок превышает себестоимость синтеза из промышленных отходов и доступного природного сырья.

Перспектива использования синтетического волластонита в России, на наш взгляд, определяется потребностями практически всех отраслей экономики. Строительная индустрия может улучшить качество основных материалов:

- стеновых изделий;
- перекрытия зданий»
- облицовочных материалов;
- отделочных материалов;
- кислотостойких бетонов;
- кирпича;
- сухих штукатурок;
- клеев;
- строительной фурнитуры;
- красок для автотрасс.

Основная тенденция развития промышленности неорганических наполнителей за рубежом – значительное расширение их ассортимента и строгое дифференцирование по областям применения в соответствии с постоянно возрастающими требованиями к качеству, возможностью экономии дорогих и дефицитных модификаторов, наполнителей и необходимостью рационального использования природных ресурсов. Однако руководители томских предприя-

тий, производящих строительные материалы, судя по результатам недавних опросов, не проявляют интереса к данной теме. Мы считаем, что такое отношение неоправданно и даже неэтично, поскольку приоритетом должно быть не расширение личных владений, а изменение подхода к управлению. Томская область занимает последнее место в регионе по объемам строительства.

### Заключение

Социальный, экономический и экологический эффекты от внедрения композитных материалов становятся все более чем очевидными, учитывая технологические особенности разработок и увеличивающиеся потребности в инновационных силикатных материалах.

Отрасли машиностроения, в режиме модернизации, судя по мировым тенденциям, будут активно использовать волластонит. Сегодня при разработке новой техники и оборудования особое внимание уделяется созданию конструкционных термостойких материалов с заданными каталитическими и излучательными свойствами. По статистике, около 12–15 % мирового потребления волластонита приходится на металлургическую промышленность. Это связано с тем, что волластонит обладает низкотемпературными флюсовыми свойствами, стабильным химическим составом, высокой чистотой и нейтральной щелочностью.

Проблемы получения и применения силикатов и гидросиликатов кальция, стехиометрический состав которых можно выразить формулами  $a\text{CaO} \cdot b\text{SiO}_2$  и  $a\text{CaO} \cdot b\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  соответственно, вызывают все больший интерес со стороны учёных и специалистов. Это объясняется масштабами использования природных и синтетических силикатных минералов в различных отраслях промышленности, техники и науки. Силикаты кальция разного состава и структуры, благодаря своим физическим и физико-химическим свойствам, нашли широкое применение в качестве наполнителей композиционных материалов в строительной, резинотехнической, целлюлозно-бумажной, химической, керамической, стекольной, лакокрасочной, электротехнической и других отраслях промышленности.

Перспективным направлением является использование этих соединений в качестве основы для получения функциональных материалов различного назначения. Особый интерес представляют силикаты кальция со стехиометрическим соотношением  $\text{CaO}$  к  $\text{SiO}_2$ , равным 1, типичным представителем которых является волластонит. Новый полиморф волластонита, открытый нами в этой системе, объясняет квантовые свойства и квантование при росте кристаллов.

Волластонит обладает высокой химической стойкостью, обеспечивает материалам на его основе негорючесть, уникальные диэлектрические свойства и низкую теплопроводность, экологическую безопасность применения. В металлургии и машиностроении, космической и авиационной технике, строительстве, медицине и фармакологии волластонит доказал свою перспективность и соответствие современным требованиям.

Синтетические силикаты кальция, в отличие от природных, более однородны по составу и строению, содержат меньше примесей и характеризуются дисперсным составом вплоть до тысячных долей микрона. Эти преимущества определяют их более широкое практическое применение. Современные высокотехнологичные методы получения силикатов кальция позволяют изменять

свойства конечных продуктов в широком диапазоне и тем самым обеспечивают оптимальное соответствие требованиям конкретного направления использования. Сырьевая база для получения синтетических силикатов кальция практически неограниченна, поскольку кальций- и кремнийсодержащие соединения присутствуют в различных техногенных отходах и природных образованиях. Поэтому актуальным становится получение синтетических силикатов кальция с заданными характеристиками. Для синтеза игольчатого волластонита нами используется дезинтегратор Хинта (Эстония, г. Таллин).

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Рахманова И.А., Мананков А.В.* Новые функциональные композиционные материалы на основе волластонита для машиностроения // Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции. Томск, 2024. С. 50–54. EDN: PRMDMR
2. *Исламова Г.Г.* Технология синтетического волластонита из природных кальций- и кремнийсодержащих соединений : специальность 05.17.01 – Технология неорганических веществ : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2012. 24 с.
3. *Мананков А.В., Рахманова И.А.* Инновационные материалы класса «сикам» и концептуальный этап их жизнедеятельности // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 2. С. 170–182. EDN: OYATHP
4. *Мананков А.В., Рахманова И.А.* Концептуальная фаза жизненного цикла инновационного материала – синтетического волластонита // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 368. С. 108–114. EDN: PWHSGI
5. *Белов Н.В.* Очерки по структурной минералогии. Москва : Недра, 1976. 344 с.
6. *Vukovich M.Jr.* Wollastonite in melted ceramic systems // J. Canad. Ceram. Soc., 1962. V. 31. P. 100–103.
7. *Weston R.M., Rogers P.S.* The growth of calcium metasilicate polymorphs from supercooled melts and glasses // Mineral. Magazine. 1978. V. 42. P. 325–335.
8. *Мананков А.В., Локтюшин А.А.* Нетрадиционные технологии силикатов на основе фундаментальных научных разработок // Геология, геохимия, минералогия и металлогения юга Сибири. Томск, 1990. С. 85–87.
9. *Мананков А.В., Горюхин Е.А., Локтюшин А.А.* Волластонитовые, пироксеновые и другие материалы из промышленных отходов и недефицитного природного сырья. Томск : Изд-во ТГУ, 2002. 168 с.
10. *Локтюшин А.А., Мананков А.В.* Поляризационная трансляция фазовых переходов и динамика образования метасиликатов щелочно-земельных элементов в вязких расплавах // Минералогия, геохимия и полезные ископаемые Сибири. Томск, 1990. Вып. 1. С. 16–22.
11. *Асхабов А.М.* Квазаронные модели зарождения и роста кристаллов // ЗРМЛ. 2016. № 5. С. 17–24.
12. *Аль-Дарабсе А.М.Ф.* Исследование экономических систем в авиастроении на основе методологии функционально-стоимостной инженерии // Молодежь и наука XXI века : материалы Международной научной конференции. 2018. С. 470–472.
13. *Аль-Дарабсе А.М.Ф., Вольсков Д.Г.* Авиационная промышленность – смягчения последствий изменения климата посредством технологии и политики // Проблемы технического сервиса в АПК : сборник научных трудов II студенческой всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 21–28.
14. *Мананков А.В., Рахманова И.А.* Структура инновационного процесса производства наноматериалов на основе промышленных отходов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 1. С. 143–149. EDN: LAIXCP
15. *Мананков А.В., Рахманова И.А.* Экологические аспекты производства инновационных материалов на основе промышленных отходов // Инновации и недвижимость как матери-

альный базис модернизации экономики : материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2013. С. 227–231.

## REFERENCES

1. *Rakhmanova I.A., Manankov A.V.* New Functional Composite Materials Based on Wollastonite for Mechanical Engineering. In: *Proc. 15th Int. Sci. Conf.* Tomsk, 2024. Pp. 50–54 (In Russian)
2. *Islamova G.G.* Technology of Synthetic Wollastonite from Natural Calcium and Silicon-Containing Compounds. PhD Abstract. Kazan National Research Technological University. Kazan, 2012. (In Russian)
3. *Manankov A.V., Rakhmanova I.A.* Rock Glass-Ceramics Innovative Materials and Conceptual Stage of Their Life. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building.* 2012; (2): 170–182. (In Russian)
4. *Manankov A.V., Rakhmanova I.A.* Conceptual Phase of Life Cycle of Synthetic Wollastonite Innovative Material. *Vestnik TSU.* 2013; (368): 108–114. EDN: PWHSGL (In Russian)
5. *Belov N.V.* Essays on Structural Mineralogy. Moscow: Nedra, 1976. 344 p. (In Russian)
6. *Vukovich M.Jr.* Wollastonite in Melted Ceramic Systems. *Journal of the American Ceramic Society.* 1962; 31: 100–103. (In Russian)
7. *Weston R.M., Rogers P.S.* The Growth of Calcium Metasilicate Polymorphs from Supercooled Melts and Glasses. *Mineral. Magazine.* 1978; 42: 325–335.
8. *Manankov A.V., Loktyushin A.A.* Unconventional Silicate Technologies Based on Fundamental Scientific Developments. In: *Geology, Geochemistry, Mineralogy and Metallogeny of Southern Siberia.* Tomsk, 1990. Pp. 85–87. (In Russian)
9. *Manankov A.V., Goryukhin E.A., Loktyushin A.A.* Wollastonite, Pyroxene and Other Materials from Industrial Waste and Abundant Natural Raw Materials. Tomsk: TSU, 2002. 168 p. (In Russian)
10. *Loktyushin A.A., Manankov A.V.* Polarization Translation of Phase Transitions and Dynamics of Formation of Alkaline-Earth Element Metasilicates in Viscous Melts. *Mineralogiya, geokhimiya i poleznye iskopaemye Sibiri.* 1990; (1): 16–22. (In Russian)
11. *Askhabov A.M.* Quataronic Models of Crystal Nucleation and Growth. *ZRML.* 2016; (5): 17–24. (In Russian)
12. *Al-Darabse A.M.F.* Economic Systems in Aircraft Manufacturing Based on Methodology of Functional Cost Engineering. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Youth and Science of the 21st Century'.* 2018. Pp. 470–472. (In Russian)
13. *Al-Darabse A.M.F., Volskov D.G.* Aviation Industry - Mitigation of Climate Change Through Technology and Policy. In: *Proc. 2nd Int. Sci. Conf. 'Problems of Technical Service in Agro-Industrial Complex'.* 2019. Pp. 21–28. (In Russian)
14. *Manankov A.V., Rakhmanova I.A.* Innovative Production Process of Nanomaterials Based on Industrial Waste. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building.* 2010; (1): 143–149. EDN: LAIXCP (In Russian)
15. *Manankov A.V., Rakhmanova I.A.* Environmental Aspects of Production of Innovative Materials Based on Industrial Waste. In: *Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'Innovations and Real Estate as a Material Basis for Economic Modernization'.* 2013. Pp. 227–231. (In Russian)

## Сведения об авторах

*Мананков Анатолий Васильевич*, докт. геол.-мин. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, mav.39@mail.ru

*Рахманова Ирина Анатольевна*, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ir9039508837@yandex.ru

*Владимиров Валерий Михайлович*, канд. хим. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, glovani.v@mail.ru

**Authors Details**

*Anatoly V. Manankov*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, mav.39@mail.ru

*Irina A. Rakhmanova*, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ir9039508837@yandex.ru

*Valery M. Vladimirov*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, glovani.v@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 20.11.2024  
Одобрена после рецензирования 28.11.2024  
Принята к публикации 02.12.2024

Submitted for publication 20.11.2024  
Approved after review 28.11.2024  
Accepted for publication 02.12.2024

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

## ENGINEERING AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRDROMES, AND TUNNELS

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 6. С. 160–175.

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 (6): 160–175.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.745:625.73:504.17

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-160-175

EDN: QYUKPH

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВОДООТВОДА С АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ В СИБИРСКОМ РЕГИОНЕ

**Виктор Николаевич Лукашевич, Ольга Дмитриевна Лукашевич,  
Алексей Владимирович Черемных, Елена Юрьевна Осипова**  
*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия*

**Аннотация.** Негативными последствиями глобального изменения климата и быстрой урбанизации среди прочих является необходимость борьбы с городскими наводнениями, подтоплениями, а также повышения уровня безопасности сооружений, прилегающих к водным объектам, из-за смыва в них ливневых сточных вод и городского мусора. Решение данных проблем происходит медленно и малоэффективно. Это объясняется суровыми климатическими условиями для большей части территории и ростом числа аномальных ливней, недостаточным финансированием строительства ливневых систем со стороны государства и бизнес-структур, несовершенством нормативно-правовой базы, в основе которой заложены устаревшие сведения для расчета проектов.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью совершенствования системы отведения атмосферных сточных вод с поверхности автомобильных дорог и урбанизированных зон, особенно в условиях аномального объема дождевых вод.

**Цель работы** – оценка эколого-экономического и технологического потенциала доступных отечественных и зарубежных технологий для обеспечения эффективного ливневого водоотвода и первичной очистки поверхностных стоков.

**Задачи исследования:** проанализировать современное состояние и перспективы реализации лучших зарубежных практик сбора и удаления ливневых стоков с урбанизированной территории, эффективных водоотводных устройств; выявить и дать сравнительную оценку практик, наиболее приемлемых для условий континентального климата с продолжительным холодным периодом и значительным количеством осадков; предложить мероприятия, повышающие эффективность ливневого водоотвода.

**Методы.** В работе применены теоретические методы исследования: изучение литературных источников, теоретический анализ, междисциплинарный синтез, методы логических обобщений, патентный анализ, поисковые и статистические методы.

**Результаты.** Освещены зарубежные достижения и проблемы в сфере функционирования водоотвода от городских автомобильных дорог и очистки ливневых вод. Выявлен тренд повышения интереса к биофильным инженерным технологиям, предусматривающим стадии сбора и отведения поверхностной сточной воды, первичной ее очистки, а также обеспечения испарения или инфильтрации в глубокие водоносные горизонты.

Проанализировано состояние проблемы водоотвода в России. Приведены данные о современных технических средствах, способных обеспечить организацию системы дорожного водоотвода и при необходимости – очистки ливневых сточных вод. Выявлены основные причины неудовлетворительного состояния и недостаточности систем дорожного водоотвода. Предложены возможные варианты технических решений для повышения эффективности сбора и отведения ливневых вод.

Сформулированы выводы о путях выхода из кризисной ситуации на примере г. Томска (Западная Сибирь). Предложена конструкция для улучшения сбора и отведения атмосферных вод с дорожных участков.

**Выводы.** Систематизация и обобщение подходов к борьбе с избыточными городскими ливневыми водами служат основой для совершенствования современных российских систем водоотвода. Зарубежный опыт отвода, изолирования, утилизации ливневых вод может применяться и получить развитие в разных природно-климатических зонах России при условии учета специфики их геоэкологической обстановки.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, атмосферные сточные воды, водосток, подтопление, очистка ливневых вод, водоприемник, меры по использованию городских дождевых вод, контроль загрязнения ливневых стоков

**Для цитирования:** Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д., Черемных А.В., Осипова Е.Ю. Совершенствование системы водоотвода с автомобильных дорог в Сибирском регионе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 160–175. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-160-175. EDN: QYUKPH

## ORIGINAL ARTICLE

### ROAD DRAINAGE SYSTEM DEVELOPMENT IN A SIBERIAN CITY

Viktor N. Lukashevich, Olga D. Lukashevich, Aleksei V. Cheremnykh,  
Elena Yu. Osipova

*Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia*

**Abstract.** Negative consequences of global climate change and rapid urbanization are problems of combating urban floods, underflooding and increasing the safety of adjacent water bodies due to the washout of storm water and municipal waste. These problems are being solved slowly and ineffectively. This is explained by harsh climatic conditions in a large number of territories, higher number of abnormal rainfalls, insufficient financial injections into the construction of storm systems from the state and business structures, imperfection of regulatory

documents based on outdated information for calculating projects. Conclusions are formulated on ways out of the crisis situation in the city of Tomsk (Western Siberia). It is proposed to improve the collection and drainage of atmospheric water from road sections.

The relevance of the work is associated with the improvement of the system of atmospheric wastewater removal from the road pavement and urbanized areas, especially at abnormal volumes of rainwater.

*Purpose:* The aim of the work is to assess environmental, economic and technological potential of Russian and foreign techniques to ensure effective storm water drainage and primary treatment of surface runoff.

*Methodology/approach:* The analysis of the current state and prospects for the implementation of the best foreign practices for collecting, removing from urbanized areas, effective water drainage devices; comparative assessment of practices that are most suitable for continental climate conditions with a long cold period and significant amounts of precipitation; measures to improve the efficiency of storm water drainage; theoretical research of literary sources, theoretical analysis, interdisciplinary synthesis; methods of logical generalizations, patent analysis, search and statistical methods.

*Research findings:* The paper highlights foreign achievements and problems of drainage and storm water treatment from urban roads. Increasing interest in biophilic engineering technologies includes stages of collection and removal of surface runoff water, its primary treatment, and evaporation or infiltration into deep aquifers. The state of the drainage problem in Russia is considered herein. Modern technical means capable of organizing a road drainage system and, if necessary, treating storm water are investigated. The main reasons for the unsatisfactory condition and insufficiency of road drainage systems are identified.

*Practical implications:* Systematization and generalization of approaches to combating excess urban storm water serve as the basis for improving modern drainage systems in Russia. Foreign experience in draining, isolating, and recycling storm water can be used and developed in different natural and climatic zones of Russia with respect to the specifics of their geoeological situation.

**Keywords:** road, atmospheric waste water, drain; flooding, storm water treatment, water receiver, urban rainwater, water pollution control

**For citation:** Lukashevich V.N., Lukashevich O.D., Cheremnykh A.V., Osipova E.Yu. Road Drainage System Development in a Siberian City. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (6): 160–175. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-160-175. EDN: QYUKPH

## Введение

Актуальность. По прогнозам ООН, к 2030 г. 60 % всего жилья будет находиться на городских территориях, при этом каждый третий человек – проживать в городе с населением не менее 500 000 чел. Интенсивная урбанизация имеет своим следствием увеличение непроницаемых для воды городских поверхностей. Это существенно изменяет естественный гидрологический цикл на урбанизированных территориях. Городские наводнения стали проявлять себя в последнее десятилетие как катастрофические явления в мировом масштабе [1, 2]. Происходит разрушение объектов инфраструктуры, загрязнение уличными отходами природной среды. Зарубежные исследователи из стран с низким уровнем водных ресурсов на душу населения ставят и решают проблему возможности эффективного водоотвода, очистки и дальнейшего использования дождевых вод в водохозяйственной системе.

По данным Росстата и «МосводоканалНИИпроект», из-за неудовлетворительной работы ливневых систем водоотвода в 982 из 1092 российских горо-

дов регулярно происходят подтопления (затопления). По данным за 2022 г., из 280 тыс. км городских улиц длина дорог, оборудованных водостоками, составляла 36 тыс. км, т. е. лишь 13 %. При этом даже на участках с имеющимся водоотводом часто происходит подъем воды на дорогах и тротуарах из-за плохого состояния водопрпускных конструкций, дренажных систем.

По словам заместителя Председателя Правительства Российской Федерации Марата Хуснуллина<sup>1</sup>, износ ливневой канализации в большинстве городов составляет 60–90 %. Фактически она находится в неудовлетворительном состоянии. В результате негативное воздействие оказывается на окружающую среду, здоровье и имущество горожан.

В 2022 г. в Минстрое России был разработан долгосрочный поэтапный план модернизации ливневых систем. Он предусматривает более строгое регламентирование соблюдения коммунальными службами нормативов при эксплуатации ранее созданных водоотводящих сетей, минимизацию объемов атмосферных осадков за счет использования экопарковок и водопроницаемых покрытий.

Регионы должны в обязательном порядке провести полную ревизию систем ливневой канализации на своих территориях в 2023–2026 гг., создать проекты их развития, построить новые или модернизировать существующие объекты в рамках федеральной программы «Модернизация коммунальной инфраструктуры» в 2024–2030 гг.<sup>2</sup>

Вместе с тем итоги 2023–2024 гг. в контексте экобезопасности ливневой канализации по сибирским городам не позволяют считать результаты успешными.

Цель работы – оценка эколого-экономического и технологического потенциала доступных отечественных и зарубежных технологий для обеспечения эффективного ливневого водоотвода и первичной очистки поверхностных стоков.

Задачи исследования:

– проанализировать современное состояние и перспективы реализации лучших зарубежных практик сбора и удаления воды с урбанизированной территории, эффективных водоотводных устройств;

– выявить и дать сравнительную оценку практик, наиболее приемлемых для условий континентального климата с продолжительным холодным периодом и значительным количеством осадков;

– предложить мероприятия, повышающие эффективность ливневого водоотвода.

### Методы исследования

В работе применены теоретические методы исследования: изучение литературных источников, теоретический анализ, междисциплинарный синтез, методы логических обобщений, патентный анализ, поисковые и статистические методы.

<sup>1</sup> Эксперты обсудили «дорожную карту» модернизации ливневой системы в городах России // Гост Ассистент: сайт. URL: <https://gostassistant.ru/news/488-eksperty-obsudili-dorozhnyuyu-kartu-modernizacii-li>

<sup>2</sup> Модернизацию «ливневок» могут включить в новый этап нацпроекта «Экология» // Всё о стройке: сайт. URL: <https://xn--b1agapfwapqcl.xn--p1ai/modernizacziyu-livnevok-mogut-vklyuchit-v-novyj-etap-naczproekta-ekologiya/>

## Результаты и их обсуждение

Анализ доступных зарубежных и отечественных публикаций, посвященных управлению городскими поверхностными сточными (ливневыми) водами [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15], позволил выделить несколько трендов в исследованиях. Ниже приведены те из них, которые рассмотрены в большей части исследований.

1. *Концепция городов-губок (Sponge City)*. Предполагается, что города должны действовать подобно губкам, поглощая воду во время ливней и наводнений и высвобождая её во время засухи. Для этого необходимо сохранять природную среду, создавая условия для естественного круговорота воды, и применять экологически устойчивые способы преобразования серой инфраструктуры (плотины, дамбы и системы ливневой канализации) в зелёную инфраструктуру [2, 4].

Дождевая вода на городской территории впитывается «губчатыми телами», роль которых играют почва, растительность, водные объекты. В них происходит депонирование и самоочищение воды. Такая вода впоследствии может испаряться в жаркую погоду, создавая комфортные условия горожанам, а также использоваться на нужды города. «Губчатыми телами» являются парки-губки, пешеходные либо велосипедные дорожки, вымощенные дренажным бетоном, водопроницаемым кирпичом или другим водопроницаемым покрытием (например, изготовленным из отходов каучука, отсева горных пород и связующего). Для мощения могут быть использованы различные материалы, уложенные на слой песка в виде плиток, тротуарных блоков, камней, при условии, что зазоры между ними будут обеспечивать просачивание воды.

2. *Совершенствование защитных сооружений от воздействия воды*. Исследования по этому направлению посвящены разработке средств защиты автомобильной дороги от воздействия атмосферных осадков в штатных и штатных ситуациях (при затоплениях и подтоплениях) путем повышения прочности и устойчивости конструктивных элементов дороги [8, 11, 14, 15]. В 2022 г. на территории РФ вступил в силу новый стандарт ГОСТ Р 59433–2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Сооружения защитные от воздействия воды. Общие технические требования». Он регламентирует процедуры проведения всех защитных мероприятий на автомобильных дорогах «для обеспечения сохранности автомобильной дороги от отрицательного воздействия воды при воздействии опасных гидрогеологических и природных явлений».

3. *Создание новых и модернизация существующих конструкций и отдельных элементов системы ливневой канализации: дождеприемных колодцев, трубопроводной арматуры, ливневых решеток и лотков* [12, 13, 16, 17].

Во многом в России заимствуется передовой опыт западноевропейских стран с близкими погодно-климатическими условиями (Европейский стандарт BS EN 752:2017. Drain and sewer systems outside buildings. Sewer system management. 2017. p.128).

4. *Ревизия и совершенствование устаревших типовых методов проектирования*. Необходимы углубленный анализ и обобщение ранее регламентированной методологии расчетов схем водоотвода с проезжей части дорог, более

детальное рассмотрение вариантов типового и индивидуального проектирования систем ливневой канализации. Это связано с особенностями гидрологического обоснования дорожного водоотвода в меняющихся климатических условиях [18]. Устаревшие ливневые карты и непредсказуемые периоды длительных обильных дождей, проявляющие себя в последние годы, не позволяют в полной мере использовать в расчетах методическую базу проектирования водоотвода с дорог, созданную на основе систематизации достижений инженерной геологии, гидрологии, геоэкологии в 1960–80-х гг. [19, 20].

В современной научной литературе практически не встречается монографий с глубоким теоретическим осмыслением результатов воздействия наблюдающихся климатических изменений на строительную отрасль. Опубликованные статьи чаще всего посвящены отдельным частным случаям, например, связанным с оттаиванием ранее мерзлых грунтов, или примерам построения математических моделей, которые в силу необходимости могут пренебречь несколькими факторами для упрощения (создания идеального объекта) и не отражают в полной мере процессы в системе «ливневая канализация города – автомобильная дорога – уличные пространства» [19, 20, 21]. Подходы к методам создания моделей, имитирующих поверхностный сток, представлены в работах [5, 18, 22]. В статьях [19, 21] дана оценка применимости зарубежных нормативно-методических документов к российским реалиям и указаны причины расхождения в расчетных характеристиках при определении расходов и диаметров самотечной сети дождевой канализации.

5. *Экономическое обоснование и менеджмент.* Примером этого направления исследований служит монография [13]. Авторским коллективом сделан вывод, что многолетняя негативная ситуация с ливневыми потоками в российских городах связана с рядом факторов. Это нехватка достоверных сведений о состоянии инфраструктуры водоотведения поверхностных стоков; непонимание городскими администрациями реального состояния межведомственного взаимодействия в вопросах строительства и содержания ливневой канализации; отсутствие надежных механизмов менеджмента и финансирования соответствующей инженерной инфраструктуры; недостаточное внимание к зарубежным трендам и положительному опыту других стран. В рассматриваемой работе [13] на основании сведений о системах ливневой канализации в 85 российских городах, отличающихся численностью населения, экономическими, географическими, природно-климатическими условиями, сделаны выводы, заслуживающие внимания в контексте темы настоящей статьи.

Отмечается пренебрежительно малая корреляция между длиной инженерных сетей ливневой канализации и численностью населения города; худшее функционирование ливневой сети в крупных городах, по сравнению с малыми; разный объем финансовых затрат на содержание сетей отведения ливневых стоков. В целом сделано заключение об отсутствии системности и слабой изученности российской практики управления поверхностными стоками [13]. Следует согласиться, что вместо устойчивых, стратегических преобразований в исследуемой сфере наблюдаются разовые вынужденные мероприятия в режиме выполнения аварийных работ, тесно связанных с сезонными климатическими проявлениями, чаще стихийного (катастрофического) характера.

В табл. 1 приведена оценка возможности реализации зарубежного опыта управления городскими поверхностными сточными водами в российских условиях. В качестве примера исследовано несколько критериев, без учета технических аспектов проблемы.

Таблица 1

**Выбор критериев для оценки причин и последствий затопления  
улично-дорожной сети и выработки мероприятий  
по управлению городскими поверхностными водами**

Table 1

**Evaluation criteria for causes and consequences of road network flooding  
and measures for urban surface water management**

Критерий, сфера его приложения	Обоснование критерия	Потенциальная возможность использования в российских условиях
Сохранение и реабилитация окружающей среды по модели «ливневый сад»	Сотрудничество и скоординированные действия междисциплинарной команды инженеров-строителей, ландшафтных дизайнеров, проектировщиков, ученых-экологов	Применимо, продуктивно для реализации комплексного подхода в проектировании. Препятствием является ведомственная разобщенность специалистов
Стратегическое планирование	Сохранение и улучшение природной и социальной среды через реализацию экологической политики, передового опыта на отдаленную межпоколенную перспективу	Соответствует экологическому законодательству и действующим нормативам. Имеется определенный положительный опыт в управлении ландшафтом, проектировании с учетом жизненного цикла автомагистрали
Экологическая безопасность: мониторинг, контроль, оценка	Разработка показателей экологической результативности мероприятий обеспечивает эффективное управление экологической ситуацией. Процедуры и принципы мониторинга – важная часть оценки экологических показателей	Российские показатели разработаны, продолжается их совершенствование, актуализируются новые критерии. Недостаток: методические руководства по их применению носят рекомендательный характер, следовательно, могут не выполняться
Обеспечение комфорта и безопасности для пассажиров, водителей, пешеходов, жителей придорожных домов	Ревизия, обновление на основе компромиссного решения противоречий ведомственных нормативно-правовых документов. Придание документам обязательного, а не рекомендательного статуса	Вопросам безопасности в последние 7 лет уделяется большое внимание государственных структур, ситуация улучшается (по данным Росстата), реализуются нацпроекты «Жилье и городская среда», «Безопасные и качественные дороги»
Использование новейших цифровых технологий в сфере управления ливневыми стоками	Новые проекты должны создаваться на основе системного подхода, с использованием моделирования, автоматизированного сбора и передачи данных	Активно внедряется крупными компаниями, но недоступно мелким региональным организациям. Ощущается нехватка квалифицированных кадров

На федеральном и ведомственном уровне нормативно-правовая база, касающаяся строительства, содержания и эксплуатации ливневой канализации, разработана достаточно подробно. Предусмотрено, что проектирование ливневой канализации проводится в соответствии с генеральными планами городов и поселений, основывается на проектах планировки и застройки районов. Учитываются ряд требований к очистке сточных вод перед сбросом в объекты окружающей среды, характер рельефа и климата, а также особенности геологических, гидрологических, экологических факторов (ГОСТ Р 59611–2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Система водоотвода»; приказ Минстроя России от 25.12.2018 № 860/пр «Об утверждении СП 32.13330.2018 «СНиП 2.04.03-85 Канализация. Наружные сети и сооружения»; «Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты»; дополнения к СП 32.13330.2018; ОДМ 218.8.005–2014 «Методические рекомендации по содержанию очистных сооружений на автомобильных дорогах» и др.).

Представляет интерес опыт ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»<sup>3</sup>. В рамках проекта RAINMAN разрабатывается технико-экономическое обоснование мероприятий по адаптации городских систем водоотведения к изменяющимся климатическим условиям: уменьшение коэффициентов стока благодаря внедрению водопроницаемых покрытий, корректирование проектировочных нормативов, оптимизация потоков и емкостей при водоотведении.

Из перечисленных возможностей административно-правового, экономического и технико-технологического пути управления городскими поверхностными сточными (ливневыми) водами рассмотрим те, которые представляют интерес для условий г. Томска – крупного города, областного центра в Западной Сибири. Результаты такого исследования могут быть распространены на другие сибирские города с населением 300–400 тыс. жителей и сходными природно-климатическими условиями.

Томск расположен в природной зоне таежных лесов (более детально – средней и южной тайги с небольшими включениями лиственных и смешанных лесов) с гумидным климатом. Для этой зоны характерно избыточное количество поверхностной влаги как результат взаимного влияния и комбинации метеорологических и гидрогеоэкологических условий, особенностей рельефа (резкие перепады температур, низкие зимние температуры, неравномерное распределение осадков по сезонам года и декадам, перенасыщенность водой верхних горизонтов, склонность к образованию многочисленных оврагов и др.). Негативные ситуации усугубляются в последнее десятилетие, когда за сутки может выпасть 60–70 % от месячной нормы осадков.

Как следствие, автомобильные дороги на протяженных участках в разных районах города испытывают длительное переувлажнение. При этом ливневые сточные воды на дорогах и соседствующих улицах загрязнены нефте-

<sup>3</sup> Адаптация систем водоотведения Санкт-Петербурга к интенсификации атмосферных осадков в условиях изменения климата // Voda News: сайт. URL: <https://vodanews.info/adaptaciya-sistem-vodootvedeniya-sankt-peterburga-k-intensifikacii-atmosferyh-osadkov-v-usloviyah-izmeneniya-klimata/>

продуктами и другими органическими веществами (микрочастицы каучука, поверхностно-активные вещества, растворители и эмульгаторы, компоненты антифризов, используемые при обработке и очистке автомобилей). Отрицательное воздействие оказывают также компоненты дорожных антигололедных смесей, тяжелые металлы. Все указанные загрязнители негативно влияют на характеристики земляного полотна и дорожной одежды. При сбросе без очистки ливневых вод на рельеф или в открытые водоемы наносится значительный вред почвенным и водным экосистемам.

Состояние системы ливневой канализации в г. Томске вызывает серьезные нарекания со стороны транспортного сектора, горожан – автомобилистов и пешеходов. Социальные сети последние 20 лет заполнены фотографиями, иллюстрирующими негативные последствия для уличной инфраструктуры весеннего снеготаяния и летне-осенних дождей (рис. 1).



Рис. 1. Состояние участков автомобильных дорог в г. Томске летом 2024 г. после интенсивных дождей

Fig. 1. Negative condition of road sections in Tomsk in summer 2024 (photo by the authors)

Ливневая канализация начала строиться в Томске с 1960 г., достигнув общей протяженности 202 км (диаметр – 100–1650 мм). 9 % сетей построено в период 1960–1970 гг., 32 % – в 1970–1980 гг., 35 % – в 1980–1990 гг., 21 % – в 1990–2000 гг., 3 % – в 2000–2014 гг.). Большая часть труб изготовлена из железобетона, 29 % – из асбоцемента, доля труб из других материалов указана в табл. 2.

Изначально и до настоящего времени ливневая канализация не покрывает потребности города в полной мере и характеризуется высокой (30–90 %) степенью износа. В соответствии с этим требуется реконструкция участков трубопроводов ливневой канализации, а также дренажных систем для повышения качества водоотведения.

По ситуации на 2024 г. отведение ливневых сточных вод с территории г. Томска осуществляется по самостоятельной сети водоотведения (полная раздельная система водоотведения сточных вод). Сбор и транспортировка поверхностных сточных вод (совокупности дождевых, снеготалых, дренажных, поливочных вод) производится по самотечным коллекторам с установленными на них канализационными насосными станциями. Атмосферные воды посту-

пают в систему водоотведения через дождеприемные колодцы, действующие на коллекторах ливневой канализации. По коллекторам поверхностные сточные воды поступают через водовыпуски в естественные водные объекты, расположенные на территории города. Водовыпуски не оборудованы очистными сооружениями, что негативно сказывается на качестве воды в реках и озерах.

Таблица 2

**Характеристика сетей ливневой канализации по типам материала труб**

Table 2

**Pipe materials for storm water drainage networks**

Материал	% от всего количества
1. Железобетон	51,25
2. Асбоцемент	29
3. Чугун	6,25
4. Керамика	5,5
5. Сталь	5,5
6. Корсис (ПЭ)	2,25
7. Полиэтилен	0,25

Дренажная сеть представляет собой систему, включающую открытую и закрытую части. По сведениям, полученным при масштабной инвентаризации ливневой канализации в 2018 г., состояние колодцев, водосборных лотков, трубопроводов в основном удовлетворительное.

Вместе с тем во время экстремальных осадков ливневая канализация работает неудовлетворительно. В ряде районов города даже при необильных дождях наблюдается подтопление придомовых и дворовых участков, размывается грунт, разрушается асфальтобетонное покрытие. Это может свидетельствовать о неудовлетворительном состоянии коллекторов, повреждениях и загрязнении труб, колодцев песком, бытовым и растительным мусором. Развитию подтопления способствуют особенности рельефа, плохие фильтрационные характеристики грунта, близкое залегание грунтовых вод, большая доля территорий, сверху «запечатанных» водонепроницаемыми покрытиями, препятствующими естественной инфильтрации воды.

Выполнена попытка применения системного анализа к рассматриваемой в статье проблеме. Результаты проведенного исследования представлены на рис. 2 в виде системы элементов, которые в совокупности способны обеспечить условия ливневой безопасности автомобильной дороги.

Показанные на рис. 2 элементы не могут считаться исчерпывающими и единственно верными. Значение каждого из них проанализировано в работах других авторов [1, 5, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19]. В качестве примера ниже рассмотрены конкретные технические решения, использование которых способно повысить эффективность ливневой канализации без больших финансовых затрат на реконструкцию.

На рис. 3, 4 приведены иллюстрации, поясняющие описание к патентам на полезные модели RU 173885 и RU 133853. Размещение таких устройств на требующих особого внимания участках позволит улучшить работу ливневой сети.



Рис. 2. Элементы комплексного обеспечения ливневой безопасности автомобильной дороги  
Fig. 2. Elements of integrated provision of storm water safety of the road

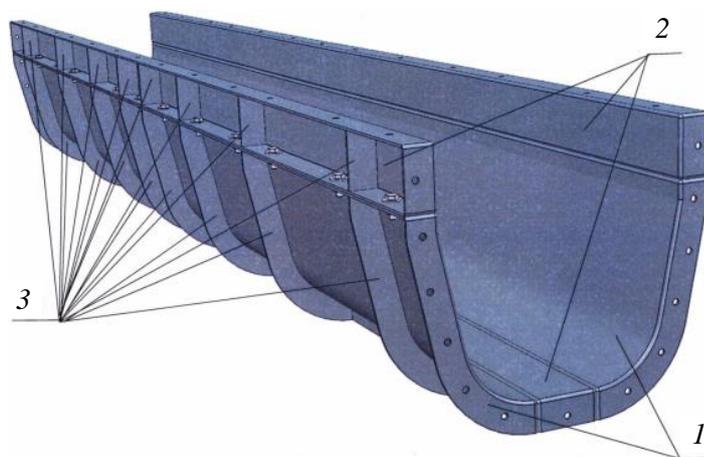


Рис. 3. Водоотводный лоток из прочного коррозионно-стойкого композиционного материала, включающий длинномерные элементы 1, 2 с ребрами жесткости 3 по патенту на полезную модель RU 173885 [16]

Fig. 3. Drainage channel made of durable corrosion-resistant composite material, including long elements (1, 2) with stiffening ribs (3) according to the utility model patent RU 173885 [18]

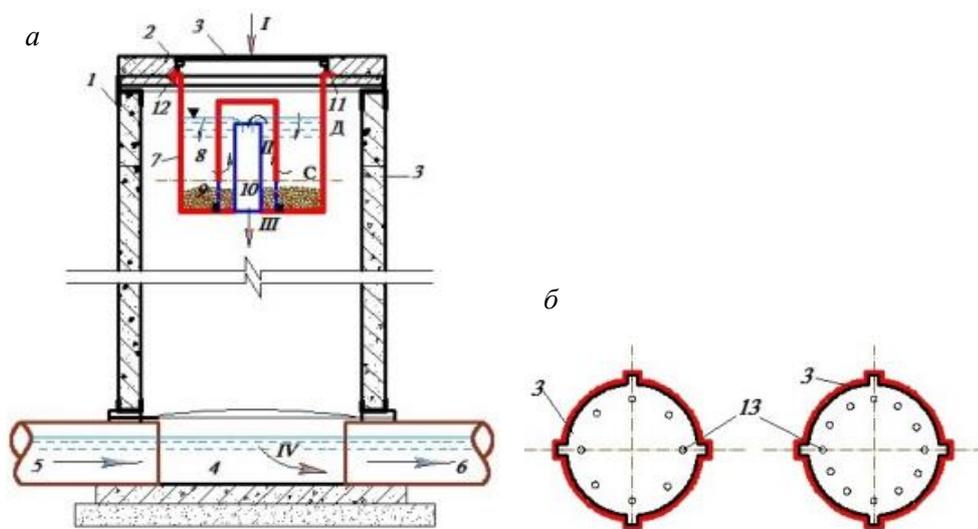


Рис. 4. Устройство для приема поверхностного стока в систему канализации (а) и крышка люка к нему (б) по патенту на полезную модель RU 133853 [17]:

1 – колодец; 2 – люк; 3 – крышка люка; 4 – лоток; 5 – трубопровод подвода сточных вод; 6 – трубопровод отвода сточных вод; 7 – глухой в нижней и открытый в верхней части съемный водоприемный цилиндр; 8 – внутренний глухой в верхней и открытый в нижней части водоотводной цилиндр; 9 – прорези; 10 – водоотводная труба; 11 – герметичное соединение; 12 – крепление; 13 – водоприемные отверстия; I – поступление в колодец; II – поступление во внутренний водоотводной цилиндр; III – отведение вод по водоотводной трубе; IV – отведение вод в трубопровод сети водоотведения; Д – режим отведения поверхностных вод; С – режим сухой погоды

Fig. 4. Device for receiving surface runoff into sewerage system (a) and manhole cover (b) according to the to the utility model patent RU 133853 [17]:

1 – well; 2 – manhole; 3 – manhole cover; 4 – tray; 5 – sewage water supply pipeline; 6 – sewage water drainage pipeline; 7 – withdrawable water intake cylinder blind at the bottom and open at the top; 8 – internal water intake cylinder blind at the top and open at the bottom; 9 – slots; 10 – drainage pipe; 11 – tight joint; 12 – fastening; 13 – water intake holes; I – well inflow; II – internal drainage cylinder inflow; III – water discharge through the drainage pipe; IV – water discharge into the drainage network pipeline; D – surface water discharge; C – dry weather mode

Для отвода воды с дорожного покрытия можно предложить ливневый отвод открытого типа (рис. 5).

Он предназначен для предотвращения скопления воды на поверхности проезжей части городских улиц. Открытые ливневые отводы устанавливаются по краям проезжей части дороги и отделяются от нее металлическими ограждениями с целью недопущения проезда автотранспорта по обустроенной полосе ливневого отвода. Со стороны тротуаров ливневый отвод отделяется бордюром, что препятствует попаданию сточных вод на тротуар. С целью удобного обслуживания и осмотра ливневый отвод монтируется из бетонных водоотводных лотков марки Л-10-7,5 (Б-1-20-75) открытого типа. Обслуживание (очистка лотков от снега, пыли и листьев) возможно механизированным способом.

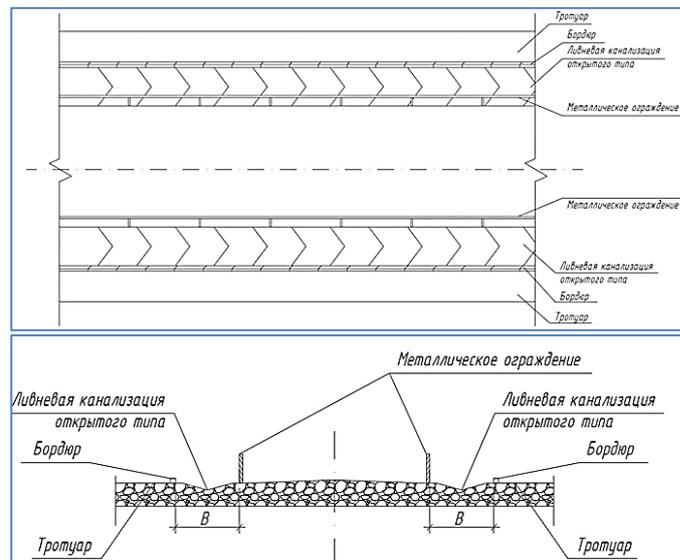


Рис. 5. Схема устройства ливневой канализации открытого типа  
 Fig. 5. Schematic of open-type storm sewer system

Ширина ливневого отвода выбирается в соответствии с габаритной шириной колесного мини-погрузчика типа Bobcat. Монтаж ливневого отвода открытого типа менее трудоемок и более безопасен по сравнению с подземным вариантом.

### Заключение

Зарубежными авторами, изучавшими вопросы устойчивости городской водной инфраструктуры в условиях современных климатических вызовов, показана необходимость перестройки процесса проектирования и эксплуатации городских систем водоотведения для адаптации к возможным крупномасштабным разрушительным водно-экологическим бедствиям.

Представляется перспективным применение концепции городов-губок как природосообразного приема для использования городских водоносных горизонтов, обладающих достаточным инфильтрационным потенциалом, в качестве естественных резервуаров для атмосферных вод. Непроницаемые покрытия автомобильных дорог, прилегающих к ним объектов инфраструктуры, тротуаров, площадок – все это блокирует естественную инфильтрацию и подпитку городских верхних водоносных горизонтов, которые, в отличие от горизонтов, находящихся в ненарушенных условиях, пополняются только за счет протечек в трубах и резервуарах, избыточного орошения или просачивания осадков из парков и клумб. Размещение устройств для инфильтрации (тротуары и автостоянки из водопроницаемых материалов и др.) обходится дешевле, чем монтаж подземных труб и резервуаров, мониторинг инфраструктуры для транспортировки, накопления и очистки собранной воды.

При проектировании системы сбора и очистки поверхностного стока представляют трудность расчеты максимальных объемов ливневых вод, учет

изменившихся параметров, указанных в устаревших методических изданиях. Результаты неточных расчетов создают препятствия для правильной оценки объемов поверхностных сточных вод, поступающих на очистные сооружения или сбрасываемых в водотоки и на рельеф.

Важно также знать необходимые для проектирования характеристики технологических схем локальных очистных сооружений с учетом наилучших доступных технологий.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kea K., Dymond R., Campbell W. An analysis of patterns and trends in United States stormwater utility systems // JAWRA Journal of the American Water Resources Association. 2016. V. 52. № 6. P. 1433–1449. DOI: 10.1111/1752-1688.12462
2. Peng Y., Reilly K. Using nature to reshape cities and live with water: an overview of the Chinese Sponge City programme and its implementation in Wuhan // European project, Grow Green. 2021.
3. Bertram N.P. et al. Synergistic benefits between stormwater management measures and a new pricing system for stormwater in the City of Hamburg // Water Science and Technology. 2017. V. 76. № 6. P. 1523–1534. DOI: 10.2166/wst.2017.337
4. Geyley S., Bedtke N., Gawel E. Sustainable stormwater management in existing settlements – Municipal strategies and current governance trends in Germany // Sustainability. 2019. V. 11. № 19. P. 5510. DOI: 10.3390/su11195510
5. Walski T.M., Barnard T.E., Harold E., et al. Wastewater collection system modeling and design. Bentley Institute Press : Pennsylvania USA: Exton, 2007. 606 p.
6. Kus B., Kandasamy J., Vigneswaran S., et al. Analysis of first flush to improve the water quality in rainwater tanks // Water Science and Technology. 2010. V. 61. P. 421–428. DOI: 10.2166/wst.2010.823
7. Nickel D., Schoenfelder W., Medearis D., et al. German experience in managing stormwater with green infrastructure // Journal of Environmental Planning and Management. 2013. DOI: 10.1080/09640568.2012.748652
8. Сергеев В.В., Панурин Н.М. Очистка сточных вод, отводимых с автомагистрали // Экология производства. 2012. № 3. С. 75–77.
9. Мяжков С.В., Дергачева И.В., Мяжков С.С. Влияние городского ландшафта на опасность наводнений от ливневых осадков // Центральноазиатский журнал географических исследований. 2021. № 3–4. С. 105–112.
10. Путьрев Е.И., Шеломков А.С. Экономическое обоснование экологически безопасных технологий очистки сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 1. С. 5–13.
11. Путьрев Е.И. Комплексные решения в системах ливневой канализации // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 5 (116). С. 651–659. DOI: www.dx.doi.org/10.22227/1997–0935.2018.5.651–659
12. Борткевич В.С., Миркис В.И., Драчиков С.А., Удовиченко Р.А. Развитие системы городской дождевой канализации на примере города Тюмени // Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение. 2017. № 12. С. 44–52. EDN: ZXFUER
13. Сиваев С.Б., Абдуллаев А.М., Смирнов О.О., Залян Э.С., Андреева Е.С., Летуновский А.В. Ливневая канализация в современном городе. От тарификации до инфильтрации: коллект. моногр. Москва : Изд. дом Высшей школы экономики, 2023. 120 с.
14. Логинова О.А., Азаревич Э.Н. Улучшение организации водоотвода на улично-дорожной сети Казани // Известия КазГАСУ. 2020. № 4 (54). С. 112–121. EDN: IRWPCZ
15. Бобнева А.Н. Способы отвода ливневых вод с проезжей части на равнинных городских территориях // Строительные материалы и изделия. 2022. Т. 5. № 6. С. 19–31. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-6-19-31
16. Патент № 173885 Российская Федерация, МПК E01F 5/00 (2006.01). Водоотводной лоток : № 2016149872 : заявл. 20.12.2016 : опубл. 18.09.2017 / Раннев А.К., Аликина З.Н., Сикоренко А.С., Азизов Р.Т. Бюл. № 26. 10 с.
17. Патент № 133853 Российская Федерация, МПК E03F 5/04 (2006.01), E03F 5/14 (2006.01). Устройство для приема поверхностных вод на заливяемых участках канализационной сети водоотведения : № 2012125931/13 : заявл. 21.06.2012 : опубл. 27.10.2013 / Серпокровлов Н.С., Мкртчян Т.М. Бюл. № 30. 15 с.

18. Примин О.Г., Тэн А.Э. Анализ методов гидравлического расчета систем сбора и отвода поверхностных сточных вод // Системные технологии. 2022. № 1. С. 155–165. DOI: 10.55287/22275398\_2022\_1\_155
19. Верецагина Л.М., Громов Г.Н., Тен А.Э., Худякова Д.Д. Анализ зарубежных и отечественных подходов к гидравлическому расчету самотечных сетей дождевой канализации // Водоснабжение и санитарная техника. 2020. № 10. С. 27–34. DOI: 10.55287/22275398\_2022\_1\_155
20. Галкин Ю.А. Основные решения по системе сбора, регулирования и очистки сточных вод промышленно-ливневой канализации Екатеринбурга // Водоснабжение и канализация. 2014. № 1–2. С. 71–75.
21. Громов Г.Н., Тен А.Э., Джумагулова Н.Т., Брянская Ю.В. Гидравлические характеристики и расчет инновационных систем отвода поверхностных сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2021. № 2. С. 46–52. DOI: 10.35776/VST.2021.02.05
22. Linke U. HM162. Experimental Flume 309x450mm. Hamburg : GUNT Geräte-bau GmbH, 2013. 52 p.

## REFERENCES

1. Kea K., Dymond R., Campbell W. An Analysis of Patterns and Trends in United States Stormwater Utility Systems. *Journal of the American Water Resources Association*. 2016; 52 (6): 1433–1449. DOI: 10.1111/1752-1688.12462
2. Peng Y., Reilly K. Using Nature to Reshape Cities and Live with Water: An Overview of the Chinese Sponge City Programme and its Implementation in Wuhan. European project, Grow Green, 2021.
3. Bertram N.P., et al. Synergistic Benefits Between Stormwater Management Measures and a New Pricing System for Stormwater in the City of Hamburg. *Water Science and Technology*. 2017; 76 (6): 1523–1534. DOI: 10.2166/wst.2017.337
4. Geyler S., Bedtke N., Gawel E. Sustainable Stormwater Management in Existing Settlements—Municipal Strategies and Current Governance Trends in Germany. *Sustainability*. 2019; 11(19): 5510. DOI: 10.3390/su11195510
5. Walski T.M., Barnard T.E., Harold E., et al. Wastewater Collection System Modeling and Design. Bentley Institute Press. Pennsylvania USA: Exton, 2007. 606 p.
6. Kus B., Kandasamy J., Vigneswaran S., et al. Analysis of First Flush to Improve the Water Quality in Rainwater Tanks. *Water Science and Technology*. 2010; 61: 421–428. DOI: 10.2166/wst.2010.823
7. Nickel D., Schoenfelder W., Medearis D., et al. German Experience in Managing Stormwater with Green Infrastructure. *Journal of Environmental Planning and Management*. 2013. DOI: 10.1080/09640568.2012.748652
8. Sergeev V.V., Papurin N.M. Treatment of Wastewater Discharged from Highway. *Ekologiya proizvodstva*. 2012; (3): 75–77. (In Russian)
9. Myagkov S.V., Dergacheva I.V., Myagkov S.S. Urban Landscape Influence on Flood Hazard from Storm Rainfall. *Tsentral'noaziatskii zhurnal geograficheskikh issledovaniy*. 2021; (3–4): 105–112. (In Russian)
10. Pupyrev E.I., Shelomkov A.S. Economic Justification of Environmentally Safe Wastewater Treatment Technologies. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2014; (1): 5–13 (In Russian)
11. Pupyrev E.I. Integrated Solutions in Storm Sewer Systems. *Vestnik MGSU*. 2018; 13. (5): 651–659. DOI: www.dx.doi.org/10.22227/1997-0935.2018.5.651-659 (In Russian)
12. Bortkevich V.S., Mirkis V.I., Sensors S.A., Udovichenko R.A. Development of Rain Sewer System in Tyumen. *Vodoochistka, vodopodgotovka, vodosnabzhenie*. 2017; (12): 44–52 EDN: ZXFUER (In Russian)
13. Sivaev S.B., Abdullaev A.M., Smirnov O.O., Zalyan E.S., Andreeva E.S., Letunovsky A.V. Stormwater Drainage in a Modern City. From Billing to Infiltration. Moscow, 2023. 120 p. (In Russian)
14. Loginova O.A., Azarevich E.N. Improvement of Drainage Organization on Kazan Road Network. *Izvestiya KazGASU*. 2020; 4 (54): 112–121. EDN: IRWPCZ (In Russian)
15. Bobneva A.N. Methods of Storm Water Drainage from the Roadway in Flat Urban Areas. *Stroitel'nye materialy i izdeliya*. 2022; 5(6): 19–31. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-6-19-31 (In Russian)

16. *Rannev A.K., Alikina Z.N., Sidorenko A.S., Azizov R.T.* Drainage Tray. UMP Rus. Fed. N 173885. 18 September 2017, No. 26. (In Russian)
17. *Serpokrylov N.S., Mkrtychyan T.M.* A Device for Receiving Surface Water in Flooded Areas of Sewage Disposal Network. UMP Rus. Fed. N 133853. 24 October 2013. (In Russian)
18. *Primin O.G., Ten A.E.* Analysis of Hydraulic Calculation Methods of Surface Wastewater Collection and Disposal Systems. *Sistemnye tekhnologii*. 2022; (1): 155–165. DOI: 10.55287/22275398\_2022\_1\_155 (In Russian)
19. *Vereshchagina L.M., Gromov G.N., Ten A.E., Khudyakova D.D.* Analysis of Foreign and Domestic Approaches to the Hydraulic Calculation of Gravity Rain Sewer Networks. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2020. No. 10. Pp. 27–34. DOI: 10.55287/22275398\_2022\_1\_155 (In Russian)
20. *Galkin Yu.A.* Wastewater Systems of Collection, Regulation and Treatment from Industrial Stormwater Sewerage in Yekaterinburg. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2014; (1–2): 71–75. (In Russian)
21. *Gromov G.N., Ten A.E., Dzhumagulova N.T., Bryanskaya Yu.V.* Hydraulic Characteristics and Analysis of Innovative Surface Wastewater Drainage Systems. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2021; (2): 46–52 (In Russian)
22. *Linke U.* HM162. Experimental Flume 309x450 mm. Hamburg: UND Gerätebau GmbH, 2013. 52 p.

#### Сведения об авторах

*Лукашевич Виктор Николаевич*, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [vnluc@yandex.ru](mailto:vnluc@yandex.ru)

*Лукашевич Ольга Дмитриевна*, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [eodluk@yandex.ru](mailto:eodluk@yandex.ru)

*Черемных Алексей Владимирович*, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [avceh@mail.ru](mailto:avceh@mail.ru)

*Осипова Елена Юрьевна*, канд. геол.-мин. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [kyky60@bk.ru](mailto:kyky60@bk.ru)

#### Authors Details

*Viktor N. Lukashovich*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 664003, Tomsk, Russia, e-mail: [vnluc@yandex.ru](mailto:vnluc@yandex.ru)

*Olga D. Lukashovich*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 664003, Tomsk, Russia, e-mail: [odluk@yandex.ru](mailto:odluk@yandex.ru)

*Aleksei V. Cheremnykh*, Undergraduate Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 664003, Tomsk, Russia, [avceh@mail.ru](mailto:avceh@mail.ru)

*Elena Yu. Osipova*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 664003, Tomsk, Russia, [kyky60@bk.ru](mailto:kyky60@bk.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 28.10.2024  
Одобрена после рецензирования 29.10.2024  
Принята к публикации 31.10.2024

Submitted for publication 28.10.2024  
Approved after review 29.10.2024  
Accepted for publication 31.10.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 6. С. 176–187.

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 (6): 176–187.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 656.13

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-176-187

EDN: RYSDJG

## **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕСТРОЕНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ИЗНОС ВЕРХНИХ СЛОЁВ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ**

**Вера Дмитриевна Тимоховец<sup>1</sup>, Анна Андреевна Чепчугова<sup>2</sup>,  
Татьяна Григорьевна Бабич<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия*

<sup>2</sup>*ООО ВСКА, г. Тюмень, Россия*

**Аннотация.** *Актуальность.* Несвоевременный износ верхних слоёв дорожной одежды асфальтобетонного покрытия является повсеместной проблемой как в Российской Федерации, так и за рубежом. Настоящая работа посвящена изучению факторов, влияющих на возникновение несвоевременного износа верхних слоёв дорожного покрытия.

В статье рассматривается изменение состояния покрытия, появляющееся по полосам наката, которое повышает риск возникновения дорожно-транспортных происшествий в определённых обстоятельствах: появление эффекта аквапланирования (потеря сцепления шины автотранспортного средства с поверхностью дороги из-за слоя воды на покрытии), перестроения транспортных средств между полосами, наличие льда на покрытии и т. д.

Проанализированы основные причины образования колеи (грузонапряжённость, нагрузка от подвижного состава, постоянное торможение и старт автотранспортных средств и т. д.) и подробно рассмотрено перестроение транспортных средств как наименее изученный фактор, но являющийся существенной причиной несвоевременного появления износа дорожного покрытия. Визуально выявлены основные типы перестроений и места их наибольшего совершения.

Проведены экспериментальные исследования по сбору статистических данных по интенсивности движения, составу потока, глубине колеи, необходимых для оценки влияния фактора перестроений транспортных средств. При мониторинге улично-дорожной сети г. Тюмени выявлена величина износа асфальтобетонного покрытия.

**Результаты.** После проведения сравнения величины колеи установлена тенденция к повышенному износу в местах частых перестроений в сравнении с местами их отсутствия либо минимального числа.

**Ключевые слова:** перестроения транспортных средств, износ асфальтобетонного покрытия, верхние слои дорожного покрытия, колея

**Для цитирования:** Тимоховец В.Д., Чепчугова А.А., Бабич Т.Г. Изучение влияния перестроений транспортных средств на износ верхних слоёв дорожного покрытия // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 176–187. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-176-187. EDN: RYSDJG

## ORIGINAL ARTICLE

## LANE-CHANGE EFFECT ON ROAD PAVEMENT WEAR

Vera D. Timokhovets<sup>1</sup>, Anna A. Cherpugova<sup>2</sup>, Tatyana G. Babich<sup>1</sup><sup>1</sup>Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia<sup>2</sup>OOO VSKA, Tyumen, Russia

**Abstract.** The wear of the road pavement is a widespread problem both in the Russian Federation and abroad. This work studies factors influencing the untimely wear of road pavements. The article considers the pavement changes along the rolling lanes that increase the risk of accidents in certain circumstances: aquaplaning (loss of the tire adhesion to the road surface due to a water layer), lane-change, ice on the pavement surface, etc. The article analyzes the main causes of track formation (traffic flow, load from rolling stock, constant braking and starting of vehicles) and reconstruction of vehicles is considered in detail as the least studied factor, but making a significant contribution to the untimely pavement wear. The main types of lane-change and the places of greatest commission are determined. Experimental studies concern collection of statistical data on the traffic flow, flow composition, track depth that are necessary to assess the impact factor of vehicle lane change. The road pavement wear is revealed during the monitoring of the street and road network in Tyumen. A tendency to increased wear in places of frequent rearrangements in comparison with places of their absence or minimal number was established after comparing the rut size.

**Keywords:** lane change, pavement wear, upper layers, track

**For citation:** Timokhovets V.D., Cherpugova A.A., Babich T.G. Lane-Change Effect on Road Pavement Wear. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (6): 176–187. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-176-187. EDN: RYSDJG

В процессе эксплуатации происходит неизбежное разрушение целостности дорожного покрытия, т. е. его деформация [1]. Одним из самых распространенных дефектов асфальтобетонного покрытия является колея. Актуальность исследования причин возникновения деформаций покрытия обусловлена тяжестью последствий, к которым ведет несвоевременное выявление предельно допустимой величины образовавшейся колеи и, как следствие, увеличение числа дорожно-транспортных происшествий (ДТП) [2].

Повышение аварийности на дороге вследствие истирания асфальтобетона является проблемой для всех городов России [3]. Процесс образования колеи негативно сказывается на стиле вождения автомобилистов (повышает напряженность, провоцирует частые объезды гребней наката, увеличивает количество перестроений в менее изношенные полосы), что приводит к увеличению аварийных ситуаций на дорогах.

Обзор дорожно-транспортной аварийности по стране за 2023 г., представленный Научным центром безопасности дорожного движения Министерства внутренних дел Российской Федерации [4], демонстрирует годовое увеличение на 0,8 % количества ДТП, в местах совершения которых выявлены нарушения обязательных требований к эксплуатационному состоянию и обустройству автомобильных дорог общего пользования, что составило 28 942 происшествия [4] (рис. 1).

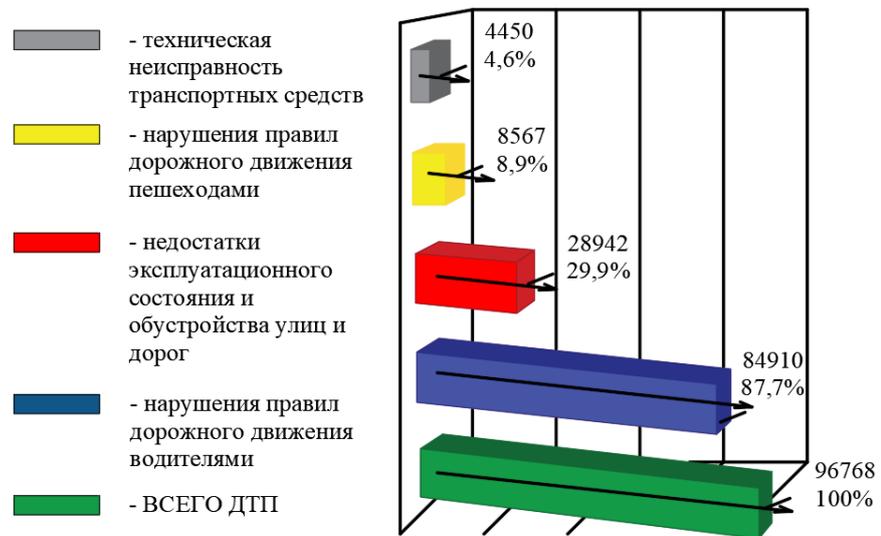


Рис. 1. Количество ДТП в РФ за январь – сентябрь 2023 г. и их основные причины  
 Fig. 1. The number of road accidents in the Russian Federation in January–September 2023 and their main causes

Согласно диаграмме, представленной на рис. 1, ДТП, случившиеся из-за недостатков эксплуатационного состояния обустройства улиц и дорог, составляют почти треть (29,9 %) от общего числа по России. К выделенной группе причин аналитики Научного центра безопасности дорожного движения относят: отсутствие горизонтальной разметки и дорожных знаков в необходимых местах; дефекты и неровность покрытия; наличие снежных валов на проезжей части; недостаточность освещения; ограниченную видимость на дороге; плохое состояние обочин и пр. По данным Информационно-аналитического обзора МВД [4], неровность покрытия или дефекты на нем являются причиной 14 % ДТП по стране, что демонстрирует необходимость устранения поперечной неровности на дорогах в целях приостановки роста автомобильных аварий в России и, соответственно, последующего снижения данного показателя.

Автомобильный транспорт занимает третье место в структуре пассажирооборота страны (23,6 %), но лидирует в рейтинге самых опасных видов транспорта по числу летальных исходов участников катастроф из расчета на длину пройденного пути [5]: ежегодно в автокатастрофах погибает от 8,5 до 24 тыс. чел. (статистика представлена за последние 10 лет).

Тяжкие последствия ДТП, происходящих из-за деформаций дороги, должны быть предотвращены [6]. Наиболее подходящий способ сведения к минимуму возможных последствий от износа покрытия может быть найден, если определить первопричины образования деформаций. Износостойкость дорожного покрытия характеризуется показателем сопротивляемости асфальтобетона воздействию транспортных средств и обусловлена комплексным влиянием нагрузок от подвижного состава и погоднo-климатических условий [7].

Факторы, определяющие интенсивность появления износа покрытия, можно разделить на механические, погоднo-климатические, грунтово-геологические и пр.

[8]. Если механическое воздействие на дорожное покрытие транспортных средств можно регулировать (человеческий фактор), то погоднo-климатические и грунтово-геологические условия не зависят от человека (природный фактор), в связи с чем необходимо подробно рассмотреть факторы человеческого влияния.

К механическим причинам износа можно отнести:

1. **Грузонапряженность.** Ускоренный износ происходит из-за дополнительной нагрузки на дорожное покрытие, которую создают транспортные средства, превышающие рекомендуемые пределы веса для дороги, такие как тяжелые грузовики со двoенными шинами или агрессивным рисунком протектора.

2. **Нагрузка от подвижного состава [9].** Вес и объем транспортных средств, проезжающих по дороге, создают огромную нагрузку. Тяжелые грузовики и транспортные средства с сосредоточенными нагрузками могут ускорить износ дорожного покрытия.

3. **Перестроения автомобилей.** Каждое движение колеса вызывает износ дорожного асфальта из-за трения между резиной и твердой поверхностью дороги. При перестроении автомобиль перемещается из одной полосы в другую, что создает дополнительное механическое воздействие на дорожное покрытие.

4. **Использование шипованных шин [10].** Шипованные шины имеют встроенные в протектор металлические шипы, которые могут врезаться в дорожное покрытие. Такое воздействие создает небольшие углубления, вызывающие локальный износ дорожного покрытия, особенно на асфальтовых поверхностях.

5. **Показатель давления в шинах.** Когда шины не накачаны до необходимого уровня давления, нагрузка на дорожное покрытие распределяется неравномерно, также увеличивается сопротивление качению, что, в свою очередь, повышает износ дорожного покрытия из-за трения.

6. **Резкое торможение и ускорение [11].** При резком торможении или ускорении автомобиля шины более агрессивно сцепляются с дорожным покрытием. Повышенное трение между ним и шинами может привести к истиранию поверхности, в результате чего мелкие частицы материала дорожного покрытия будут изнашиваться.

7. **Высокий скоростной режим автомобилей [12].** Движение на высокой скорости способствует принятию решения об обгоне более медленных транспортных средств. Такой маневр может привести к интенсивному износу в местах смены полосы движения, вызывая выбоины на дорожном покрытии.

На начальном этапе работы авторами был выделен такой параметр, как перестроение транспортных средств, наименее изученный фактор, но являющийся серьезной причиной несвоевременного появления износа дорожного покрытия. Взаимосвязь нескольких факторов может существенно влиять на износ дорожного покрытия, исходя из этого, данный параметр изучался в совокупности с другими причинами, представленными ниже:

1. Нагрузка от подвижного состава.
2. Резкое торможение и ускорение.
3. Использование шипованных шин (сезонно).
4. Грузонапряженность (на характерных участках).

На участках частых перестроений автомобилей наблюдается резкое снижение и последующий набор скорости. В совокупности с весом транспортных

средств и использованием шипованных шин область совершения маневра на дороге подвергается усиленному истиранию. Места маневров часто хаотичны, но наиболее очевидные зоны перестроений можно предугадать и скорректировать, например, при помощи дорожной разметки. При проведении регулярных наблюдений за маневрированием автомобилей на улично-дорожной сети города было выявлено, что перестроения в основном совершаются:

- в начале переходно-скоростной полосы для перестроения в основной поток (чаще при съездах с путепроводов);
- в начале выделенной полосы для правого поворота из основного транспортного потока;
- в начале выделенной полосы для левого поворота из основного транспортного потока;
- в начале выделенной полосы для разворота;
- в месте начала и конца остановочного кармана (общественный транспорт совершает перестроения вправо в карман, легковые автомобили – влево для обгона);
- в местах начала и конца автобусной полосы (общественный транспорт совершает перестроения в основной транспортный поток, легковые автомобили – в специальную полосу).

Для проведения мониторинга частоты перестроений были отобраны места в г. Тюмени, попадающие в зону видения онлайн-камер. Путем перебора были выявлены основные типы перестроений.

1. Перестроения автомобилей в полосу для поворота направо.
2. Перестроения автомобилей в полосу для поворота налево.
3. Перестроения автомобилей (автобусов) вблизи остановочного кармана (рис. 2).

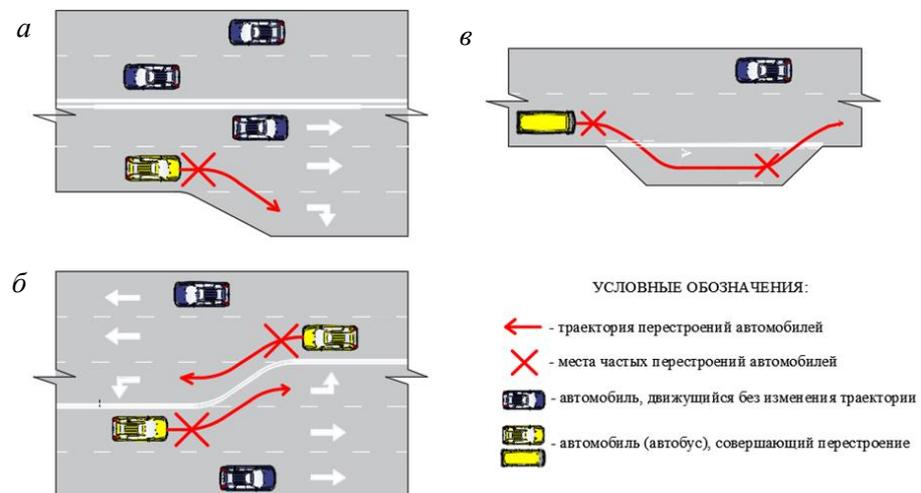


Рис. 2. Основные типы перестроений транспортных средств:

*a* – в полосу для поворота направо; *б* – в полосу для поворота налево; *в* – вблизи остановочного кармана

Fig. 2. The main types of lane-change:

*a* – to the lane for turning right; *b* – to the lane for turning left; *c* – near the stop pocket

Согласно представленной на рис. 2 схеме, с большей долей вероятности автомобили начнут совершать перестроения перед выделенными полосами для правого и левого поворота и для заезда и выезда из остановочного кармана.

Для проведения натурных испытаний были выбраны подходящие для осуществления измерений участки, при этом учитывались следующие критерии:

1. Высокая интенсивность движения на пересечении.
2. Наличие камер видеонаблюдения для онлайн-мониторинга.
3. Разнообразный состав транспортного потока.

Критерием, позволяющим значительно сузить круг подходящих измерительных участков, является наличие веб-камер. Для этого составлена таблица с указанием в данных местах интенсивности движения. Подсчет интенсивности движения, приведенной к легковому автомобилю, проводился с помощью ручного учета и с использованием камер видеонаблюдения [13]. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

### Сравнение мест наиболее частых перестроений автомобилей на примере г. Тюмени

Table 1

#### Most frequent places for lane-change in Tyumen

Место перестроения автомобилей в полосу для поворота направо			
Критерий	Пересечение ул. Республики и ул. Мельникайте при движении по ул. Республики из центра города	Пересечение ул. Ямской и ул. Л. Толстого при движении по ул. Ямской в сторону центра города	Пересечение ул. Республики и ул. Мельникайте при движении по ул. Республики в центр города
Количество полос	5	3	4
<i>N</i> для поворота направо, авт/сут	34 388	14 320	15 635
Состав транспортного потока	Легковые а/м, мотоциклы, автобусы	Легковые а/м, мотоциклы, грузовые а/м, автобусы	Легковые а/м и мотоциклы
Место перестроения автомобилей в полосу для поворота налево			
Критерий	Пересечение ул. М. Горького и ул. 50 лет Октября при движении по ул. 50 лет Октября в сторону центра города	Пересечение ул. Республики и ул. Холдильной при движении по ул. Республики в центр города	Пересечение ул. Республики и ул. Мельникайте при движении по ул. Республики из центра города
Количество полос	4	5	5
<i>N</i> для поворота налево, авт/сут	18 045	13 334	15 447
Состав транспортного потока	Легковые а/м и мотоциклы	Легковые а/м и мотоциклы	Легковые а/м и мотоциклы

Окончание табл. 1  
End of table 1

Место перестроения автомобилей вблизи остановочного кармана			
Критерий	Створ ул. Таврической и ул. Л. Толстого при движении по ул. Ямской в сторону ул. Таврической	Створ ул. Холодильной и ул. Мельникайте при движении по ул. Республики в сторону ул. Мельникайте	Створ ул. М. Горького и ул. Профсоюзной при движении по ул. 50 лет Октября в сторону ул. Профсоюзной
Количество полос	2	3	3
$N^*$ для поворота налево, авт/сут	12 927	14 023	17 028
Состав транспортного потока	Автобусы, легковые а/м, мотоциклы, грузовые а/м	Автобусы, легковые а/м и мотоциклы	Автобусы, легковые а/м, мотоциклы, грузовые а/м

\*  $N$  – интенсивность движения на выделенной полосе.

На основе полученных данных выбраны три участка для проведения измерений таким образом, что разные типы перестроений приходились на улицы города, имеющие различные параметры.

Участки измерения колеи в местах частых перестроений автомобилей:

– № 1 – г. Тюмень, пересечение ул. Республики и ул. Мельникайте в месте перестроений автомобилей в полосу для поворота направо при движении по ул. Республики из центра города.

– № 2 – г. Тюмень, пересечение ул. Республики и ул. Холодильной в месте перестроения автомобилей в полосу для поворота налево при движении по ул. Республики в сторону центра города.

– № 3 – г. Тюмень, створ ул. Таврической и ул. Л. Толстого в месте начала остановочного кармана при движении по ул. Ямской в сторону ул. Таврической.

Следующим этапом работы стало выполнение измерений величины колеи непосредственно в месте начала перестроений транспортных средств и за 10 м до него. Для проведения экспериментального исследования был выбран способ измерения с помощью двухметровой рейки и измерительного щупа [14, 15]. Измерения глубины колеи проводились в дневное время и ясную погоду не реже 3 раз в месяц (рис. 3). В ходе измерения полученные значения в каждом створе были зафиксированы в журнале измерений, фрагмент которого представлен в табл. 2. Период проведения измерений – 03.10.2023–03.06.2024.

Данные о величине колеи на аномальном и на типовом участках, содержащиеся в журналах измерений, были преобразованы в графики для визуального их прочтения (рис. 4). На графиках на оси абсцисс указаны даты проведения измерений, на оси ординат – среднее значение глубины колеи в миллиметрах, полученное как среднеарифметическое из расчетных глубин колеи по левой и правой полосам наката.



Рис. 3. Измерение величины колеи:

а, б – фотофиксация проведения измерений; в, г – фотофиксация показателей на измерительном щупе

Fig. 3. Rut measurement photography:

а, b – measurements; c, d – measuring probe

Таблица 2

**Фрагмент журнала измерений**

Table 2

**Fragment of measurement log**

№ п/п	Дата измерения	Время измерения	Характерные особенности участка	Номер измерения в поперечнике	Глубина колеи, мм		Средняя глубина колеи на участке, мм	
					Левая лоса наката	Правая лоса наката	Левая лоса наката	Правая лоса наката
1	03.10.2023	17:05	Измерения проводились в месте перестроения легковых автомобилей в останочный карман, расположенный в створе ул. Ямской и ул. Л. Толстого при движении по ул. Ямской из центра города	1	20,6	25,4	27,0	33,4
				2	24,3	31,9		
				3	36,0	43,0		
2	19.10.2023	14:31		1	20,6	25,4	27,0	33,4
				2	24,3	31,9		
				3	36,0	43,0		
3	29.10.2023	16:01		1	20,8	25,9	27,2	34,0
				2	24,8	32,6		
				3	36,2	43,6		
4	05.11.2023	14:46	1	20,8	25,9	27,2	34,0	
			2	24,8	32,6			
			3	36,2	43,6			

Окончание табл. 2  
End of table

№ п/п	Дата измерения	Время измерения	Характерные особенности участка	Номер измерения в поперечнике	Глубина колеи, мм		Средняя глубина колеи на участке, мм	
					Левая лоса наката	Правая лоса наката	Левая лоса наката	Правая лоса наката
5	20.11.2023	12:57	Измерения проводились в месте перестроения легковых автомобилей в остановочный карман, расположенный в створе ул. Ямской и ул. Л. Толстого при движении по ул. Ямской из центра города	1	20,8	25,9	27,4	34,1
				2	25,0	32,8		
				3	36,5	43,8		
6	30.11.2023	14:08		1	20,8	25,9	27,4	34,1
				2	25,0	32,8		
				3	36,5	43,8		
7	13.12.2023	16:59		1	21,5	27,6	28,5	35,6
				2	26,6	33,9		
				3	37,5	45,4		
8	26.12.2023	15:21	1	21,8	30,0	29,1	37,1	
			2	27,2	34,7			
			3	38,4	46,4			
9	05.01.2024	14:32	1	21,8	30,0	31,1	39,1	
			2	29,6	37,4			
			3	41,9	50,0			

Вестник ТГАСУ. 2024. Т. 26. № 6

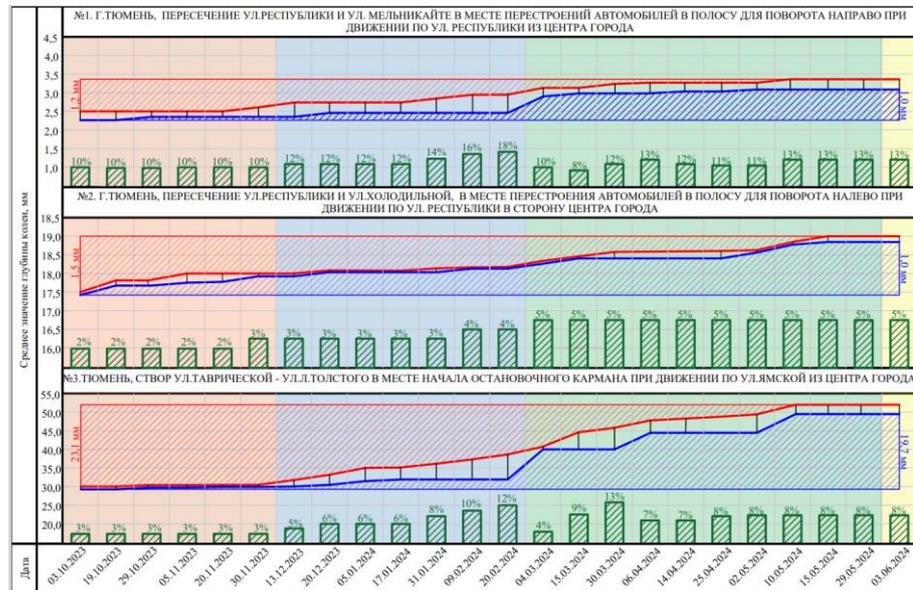


Рис. 4. Величина износа асфальтобетонного покрытия в местах частых перестроений  
Fig. 4. Pavement wear in places of frequent rebuilding

Полученные значения величины колеи на участках представлены в табл. 3.

Таблица 3

## Сравнение величины колеи на участках

Table 3

## Rut values in road sections

Номер измерительного участка	Величина колеи в месте частых перестроений автомобилей, мм		Разница величины колеи, мм	Величина колеи за 10 м до начала места частых перестроений автомобилей, мм		Разница величины колеи, мм	Разница величины колеи, %
	в первый день измерений 03.10.2023	в последний день измерений 03.06.2024		в первый день измерений 03.10.2023	в последний день измерений 03.06.2024		
№ 1	2,5	3,7	1,2	2,2	3,2	1,0	16
№ 2	17,5	19,0	1,5	17,1	18,1	1,0	33
№ 3	30,2	53,3	23,1	29,2	48,9	19,7	15

Процентное представление разницы величины износа покрытия между показаниями в месте частых перестроений автомобилей и в месте их отсутствия позволяет судить о достоверности выдвинутой гипотезы об усиленном износе в местах концентрации маневров транспортных средств.

В ходе проведения исследования были сделаны следующие выводы:

1. Влияние перестроения транспортных средств на глубину колеи составляет 15–33 %.
2. Чем выше интенсивность движения на полосе, тем с большей вероятностью возможны частые перестроения машин.
3. Интенсивность развития колеи непосредственно зависит от количества перестроившихся транспортных средств и состава транспортного потока.
4. Входящие в состав транспортного потока тяжеловесные машины даже при небольшой доле перестроений влияют на образование колеи.

Все вышеуказанные факты подтверждают необходимость регулярного мониторинга данного вопроса на различных транспортных объектах, разработки и принятия комплекса мер по улучшению ситуации с учетом частных факторов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сафонов Р.А. Типичные дефекты верхнего дорожного покрытия в России // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 2. С. 75–84. DOI: 10.14529/build200210
2. Угланов Ю.А. Исследование колеиности и определение риска возникновения ДТП на дорогах, подверженных образованию колеи // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2022. № 1 (52). С. 33–39.
3. Джурук Д.С. Методика повышения безопасности дорожного движения на двухполосных дорогах в местах концентрации ДТП на примере Сибирского федерального округа : специальность 05.22.10 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2020. 176 с.

4. *Дорожно-транспортная аварийность* в Российской Федерации за 9 месяцев 2023 года : информационно-аналитический обзор // Медиабанк : [сайт]. URL: <https://media.mvd.ru/files/embed/4994528> (дата обращения: 11.08.2024).
5. *Федеральная служба государственной статистики*. Транспорт. URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (дата обращения: 11.08.2024).
6. *Выборнова Н.С.* Деформации колеи в асфальтобетонных покрытиях // *Вестник науки*. 2024. № 5 (74). С. 1719–1721.
7. *Каменчуков А.В., Кормилицына Л.В., Лопашук В.В., Цупикова Л.С.* Влияние сверхнормативной нагрузки на износ и разрушение дорожной одежды // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021. № 4-1(106). С. 57–63.
8. *Бегай А.А., Рябинина М.М.* Факторы влияния на образование трещин в асфальтобетонных дорожных покрытиях // *Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля*. 2023. № 12 (78). С. 14–18. EDN: HBIDIS
9. *Бекенов Т.Н., Мухамбетова А.И.* К оценке воздействия автомобильной нагрузки на износ дорожного покрытия // *Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения : материалы XI Международной научно-практической конференции*. Астана : Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, 2023. С. 124–127.
10. *Ковалев Д.И., Шайхутдинова Р.А.* Проблемы колееобразования на автомобильных дорогах // *Транспортные сооружения*. 2022. № 1. Ст. 7. EDN: IJBZOE. DOI: 10.15862/10SATS122. URL: <https://t-s.today/PDF/10SATS122.pdf>
11. *Архангельский А.Н.* К вопросу о моделировании транспортных и пешеходных потоков в условиях большого города // *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. 2021. № 2 (12). С. 4–13.
12. *Тимоховец В.Д., Бабич Т.Г.* Определение величины износа дорожного покрытия // *Construction and geotechnics*. 2024. № 1. С. 33–45. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.1.03
13. *Тестешев А.А., Тимоховец В.Д., Микеладзе Т.Г.* Полипараметрические уравнения для дешифровки результатов дистанционного спутникового мониторинга транспортных потоков // *Транспортное строительство*. 2018. № 5. С. 19–21.
14. *Сайрахонов Р.Х., Мирзозода С.Б., Пирумшохи М.С., Шарифов Ф.А.* Разработка эффективного способа измерения износа дорожных покрытий // *Политехнический вестник*. Серия: Инженерные исследования. 2020. № 1 (49). С. 115–119.
15. *Лушников Н.А., Небратенко Д.Ю.* Влияние на изнашиваемость протектора автомобильных шин сцепных свойств дорожного покрытия // *Каучук и резина*. 2023. № 3. С. 116–121.

## REFERENCES

1. *Safonov R.A.* Typical Defects of Road Pavements in Russia. *Vestnik juzhno-ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: stroitel'stvo i arhitektura*. 2020; (2): 75–84. DOI: 10.14529/build200210 (In Russian)
2. *Uglanov Yu.A.* Rut and Risk of Accidents on Roads. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve*. 2022. 1 (52): 33–39. (In Russian)
3. *Dzhuruk D.S.* Methodology for Improving Road Safety on Two-Lane Roads in Places of Accidents in the Siberian Federal District. PhD Thesis. Saint-Petersburg, 2020. 176 p. (In Russian)
4. Road traffic accident rate in the Russian Federation for 9 months of 2023. Available: <https://media.mvd.ru/files/embed/4994528> 1 (accessed August 11,2024). (In Russian)
5. Federal State Statistics Service. Transportation. Available: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (accessed August 11,2024). (In Russian)
6. *Vybornova N.S.* Ruts in Road Pavements. *Vestnik nauki*. 2024; 5 (74): 1719–1721. (In Russian)
7. *Kamenchukov A.V., Kormilicyna L.V., Lopashuk V.V., Cupikova L.S.* Influence of Excessive load on Pavement Wear and Failure. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2021; 4-1 (106): 57–63. (In Russian)
8. *Begej A.A., Rjabinina M.M.* Factors Influencing Crack Formation in Road Pavements. *Vestnik luganskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Vladimira Dalja*. 2023; 12 (78): 14–18. (In Russian)
9. *Bekenov T.N., Muhambetova A.I.* Assessment of Traffic Flow Impact on Road Pavement Wear. In: *Proc. 9th Int. Sci. Conf. 'Relevant Problems of Transport and Energy: Ways of Innovative Solution'*. Astana, 2023. Pp. 124–127. (In Russian)

10. Kovalev D.I., Shajhutdinova R.A. Ruts on Highways. *Transportnye sooruzhenija*. 2022; (1): 7. (In Russian)
11. Arhangel'skij A.N. Towards Modeling of Traffic and Pedestrian Flows in Large City Environment. *Avtomatizacija i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii*. 2021; 2 (12): 4–13. (In Russian)
12. Timohovec V.D., Babich T.G. Determination of Pavement Deterioration. *Construction and Geotechnics*. 2024. (1): 33–45. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.1.03 (In Russian)
13. Testeshev A.A., Timohovec V.D., Mikeladze T.G. Polyparametric Equations for Decoding Remote Satellite Monitoring Results of Traffic Flows. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2018; (5): 19–21. (In Russian)
14. Sajrahmonov R.H., Mirzozoda S.B., Pirumshohi M.S., Sharifov F.A. Development of an Efficient Way to Measure Road Pavement Wear. *Politekhnikeskii vestnik. Seriya: Inzhenerye issledovaniya*. 2020; 1 (49): 115–119. (In Russian)
15. Lushnikov N.A., Nebratenko D.Ju. Influence of Road Surface Ruts on Wear of Automobile Tires. *Kauchuk i rezina*. 2023; (3): 116–121. (In Russian)

#### Сведения об авторах

Тимоховец Вера Дмитриевна, канд. техн. наук, доцент, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, timohovetsvd@tyuiu.ru

Чепчугова Анна Андреевна, ООО ВСКА, 625000, г. Тюмень, ул. Спасская, 26, anna-andreevna.ch@gmail.com

Бабич Татьяна Григорьевна, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, babichtg@tyuiu.ru

#### Authors Details

Vera D. Timohovets, PhD, A/Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, timohovetsvd@tyuiu.ru

Anna A. Chepchugova, ООО VSKA, 26, Spasskaya Str., 625000, Tyumen, Russia, anna-andreevna.ch@gmail.com

Tatyana G. Babich, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, babichtg@tyuiu.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 11.11.2024  
Одобрена после рецензирования 26.11.2024  
Принята к публикации 28.11.2024

Submitted for publication 11.11.2024  
Approved after review 26.11.2024  
Accepted for publication 28.11.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 6. С. 188–200.

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 (6): 188–200.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.21.004.94

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-188-200

EDN: UUPYBD

## **АДАПТИВНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СТАЛЬНЫХ МОСТОВ В МЬЯНМЕ ПУТЕМ ИНТЕГРАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОГО И ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Ольга Владимировна Смирнова, Вин Ко Мьинт Ту**

*Российский университет транспорта (РУТ/МИИТ), г. Москва, Россия*

**Аннотация.** Являясь одной из развивающихся стран мира, Мьянма переживает в настоящее время значительный всплеск активности строительства мостов. Тем не менее страна сталкивается с ограниченными ресурсами в области мостостроения, что может негативно сказаться на качестве возводимых объектов. Особую озабоченность вызывает техническое состояние мостов в Мьянме, особенно старых. Некоторые мосты в Мьянме, возведенные ранее, были построены с использованием устаревших технологий и материалов, а также в условиях сжатых сроков, поэтому в настоящее время они остро нуждаются в ремонте. Хотя создание новой инфраструктуры сыграло важную роль в транспортном секторе Мьянмы, техническое обслуживание существующей мостовой инфраструктуры также необходимо для обеспечения ее дальнейшего безопасного развития.

В настоящем исследовании представлен динамичный подход к интеграции информации и параметрического моделирования для восстановления существующих стальных ферменных мостов в Мьянме. Авторами проведена оценка текущего состояния стальных ферменных мостов в старне. Для создания параметрических сценариев использован язык визуального программирования Grasshopper, а созданная модель может быть интегрирована в инструменты информационного моделирования (BIM), такие как Tekla Structures и Midas Civil, детализации конструктивных элементов и расчетов прочности.

Интеграция параметрической модели фермы в многочисленные программные пакеты повысила гибкость процесса автоматизации проектирования, сократив трудо- и временные затраты. Такой подход к проектированию позволяет использовать несколько вариантов одной модели в рамках одного файла, упрощая процесс создания такой сложной конструкции, как мост. Результаты демонстрируют значительное улучшение временных показателей, возможность выбора альтернативных вариантов проектирования и повышение эксплуатационных характеристик конструкции. Кроме того, такой подход имеет потенциал для кардинального изменения процесса проектирования мостов, способствуя созданию более эффективных и экономически выгодных конструкций, отвечающих современным требованиям транспортной инфраструктуры.

**Ключевые слова:** Мьянма, мост, ферма, BIM, параметрическое моделирование, визуальное программирование, транспорт, инфраструктура

**Для цитирования:** Смирнова О.В., Вин Ко Мьинт Ту. Адаптивный подход к проектированию стальных мостов в Мьянме путем интеграции информацион-

ного и параметрического моделирования // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 188–200. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-188-200. EDN: UUPYBD

ORIGINAL ARTICLE

**ADAPTIVE APPROACH TO STEEL BRIDGE DESIGN  
IN MYANMAR BY INTEGRATION OF INFORMATION  
AND PARAMETRIC MODELING**

**Olga V. Smirnova, Win Ko Myint Thu**

*Russian University of Transport, Moscow, Russia*

**Abstract.** Being one of the world's developing countries, Myanmar experiences a significant surge in bridge construction. It, however, suffers resource limits in the bridge sector, which may result in quality difficulties during the construction process. There are serious concerns with the maintenance of some Myanmar bridges, particularly the older ones. Some old bridges in Myanmar were built with limited time, materials, and they are currently in critical need of renovation. While the creation of new infrastructure plays an important role in Myanmar's transport sector, maintenance of the existing bridge infrastructure is also necessary to ensure its continued safe development.

This article presents a dynamic approach to integration of information and parametric modeling of revocation of steel truss bridges in Myanmar. A brief assessment is given for the current situation of steel truss bridges in Myanmar. The Grasshopper visual programming language is utilized for creating parametric scripts, and the model is able to integrate into information modeling tools such as Tekla Structures and Midas Civil for additional details and strength analysis. The integration of the truss parametric model into numerous software packages improves the flexibility of design automation process, saving time and effort. The design approach makes it possible to get several variants of the same model in a single file, and the process of building a complicated structure like a bridge becomes considerably simpler and more efficient. The results show significant improvements in time savings, alternative design selection, and structural performance. Furthermore, this approach has the potential to revolutionize bridge design, leading to more cost-effective and efficient structures that meet contemporary demands of the transportation infrastructure.

**Keywords:** Myanmar, bridge, truss, building information modeling, parametric modeling, visual programming, transport, infrastructure

**For citation:** Smirnova O.V., Win Ko Myint Thu. Adaptive Approach to Steel Bridge Design in Myanmar by Integration of Information and Parametric Modeling. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (6): 188–200. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-188-200. EDN: UUPYBD

**Введение**

Мьянма, известная также как Бирма, является крупнейшей по площади страной в континентальной части Юго-Восточной Азии с населением около 55 млн чел., проживающих на площади 676 578 км<sup>2</sup> [1]. Растущая экономика Мьянмы привела к увеличению объемов строительства и технического обслуживания транспортных систем. Стальные ферменные мосты традиционно играют значимую роль в мостостроении Мьянмы, обеспечивая перемещение грузов и пассажиров по территории всей страны. Эти ферменные мосты вы-

соко ценятся благодаря своей способности перекрывать большие расстояния и выдерживать значительные нагрузки. Большинство длиннопролетных мостов на крупных реках Мьянмы представляют собой стальные ферменные мосты, кроме того, встречаются и подвесные мосты, и вантовые мосты. При проектировании и строительстве мостов инженеры Мьянмы часто опираются на стандарты Американской ассоциации автомобильных дорог и транспортных чиновников (AASHTO) [2]. Проектирование и строительство мостов в стране контролирует Министерство строительства. Управление общественных работ, подчиняющееся Министерству строительства, отвечает за планирование, проектирование, оценку, строительство и техническое обслуживание национальных автомагистралей, мостов, правительственных зданий и аэропортов в соответствии с разработанными требованиями.

Однако текущее состояние стальных ферменных мостов в Мьянме отражает наличие более серьезных системных проблем, с которыми сталкивается инфраструктура страны. К 2023 г. значительная часть стальных ферменных мостов в Мьянме находится в неудовлетворительном состоянии. Некоторые из них, изначально запроектированные под меньшие транспортные нагрузки и менее интенсивное движение, в настоящее время испытывают сложности с обслуживанием современных транспортных средств и более тяжелых грузов. Это приводит к частым заторам на дорогах и ускоренному износу конструкций, что вызывает опасения по поводу безопасности пассажиров.

В 2018 г. правительство Мьянмы провело масштабную программу обследования мостов, в ходе которой было обнаружено, что системы технического обслуживания некоторых стальных ферменных мостов функционируют недостаточно эффективно, поскольку отсутствуют стандартизированные методы осмотра и ремонта, а также неполный учет результатов проверок в базах данных. Около 40 % старых ферменных мостов испытывают трудности в обслуживании, что негативно отражается на их долговременной работе. Одной из наиболее серьезных проблем стальных ферменных мостов в Мьянме остается недостаточное техническое обслуживание. Регулярные проверки и необходимое техническое обслуживание часто затруднено из-за нехватки финансирования и дефицита технических ресурсов. Такие факторы, как коррозия, усталостные разрушения и старение материалов, продолжают оказывать свое негативное воздействие. Неэффективная система управления, рост интенсивности дорожного движения и последствия изменения климата усиливают износ этих сооружений.

Кроме того, на многих мостах отсутствуют развитые системы мониторинга для выявления первоначальных признаков проблем, что приводит к неожиданным разрушениям конструкций, которые угрожают общественной безопасности. Последствия изменения климата осложняют ситуацию со стальными ферменными мостами в Мьянме. Возрастающая интенсивность природных катаклизмов в сочетании с уязвимостью страны перед стихийными бедствиями подвергает многие мосты риску катастрофических разрушений. Невозможность адаптации данной инфраструктуры к ухудшающимся условиям окружающей среды отражает общую слабость устойчивости инфраструктуры Мьянмы. В связи с этим для обеспечения долговечности и безопасности стальных ферменных мостов в Мьянме требуется комплексный подход к их реабилитации.

### Параметрическое моделирование на основе информации

Проектирование моста всегда было сложной задачей для инженеров, поскольку оно предполагает сочетание инженерных принципов, экологических проблем и эстетических требований. Основной проблемой является устойчивость конструкции моста, а также его сложная геометрия и изогнутые формы. Геотехнические и экологические соображения также усложняют процесс проектирования, поэтому эстетика моста требует тонкого баланса между функциональностью и внешней привлекательностью, часто с использованием сложных элементов дизайна, которые должны быть вписаны в окружающий ландшафт. Однако благодаря все более широкому внедрению технологии параметрического моделирования, основанной на BIM (Building Information Modeling), эти ограничения могут быть преодолены. Технология информационного моделирования – это преобразующий подход к проектированию мостов, предлагающий цифровое представление, которое объединяет различные аспекты физических и функциональных характеристик моста на протяжении всего его жизненного цикла. Информационная модель представляет собой трехмерное представление всей структуры, а также ее отдельных компонентов при условии, что любые изменения автоматически отражаются в соответствующей документации [3, 4].

Сочетание информационного и параметрического моделирования позволяет инженерам использовать максимум возможностей при проектировании мостов. Задачи, которые ранее были невыполнимы, стали достижимыми. Инженеры могут автоматизировать повторяющиеся задачи проектирования, создавать индивидуальные рабочие процессы и работать со сложной геометрией. Параметрические методы существенно расширяют возможности программного обеспечения, позволяя инженерам создавать собственные функции вместо ожидания обновления или выпуска новых версий ПО. BIM активно внедряется в практику проектирования зданий, а инструмент Grasshopper становится одним из ведущих решений в этой области. Революционный метод визуального программирования Grasshopper выводит параметрический BIM на новый уровень. Это не только упрощает процесс создания сложных 3D-моделей, таких как мосты, но и повышает точность и ускоряет внесение изменений в дизайн. Комбинирование гибкого визуального программирования Grasshopper с динамическими возможностями параметрической BIM значительно расширяет возможности. На примере табл. 1 показано взаимодействие Grasshopper с программным обеспечением BIM.

Таблица 1

#### Сочетание Grasshopper с BIM

Table 1

#### Grasshopper in building information modeling

Программное обеспечение	Сочетание	Изменения в режиме реального времени при редактировании
Tekla Structures	Прямая интеграция	Да
Revit	Прямая интеграция	Да
Archicad	Прямая интеграция	Да

Окончание табл. 1  
End of table 1

Программное обеспечение	Сочетание	Изменения в режиме реального времени при редактировании
BricsCAD	Прямая интеграция	Да
Quadri	Обмен данными	Нет
CADWORK 3D	Обмен данными	Нет
Visual ARQ	BIM-плагин	Да
Speckle 2 BIM	BIM-плагин	Да
MKS BEAM	BIM-плагин	Да
Geometry GYM	BIM-плагин	Да

Создание пролетного строения обычно является одним из самых сложных аспектов для проектировщиков из-за уникальности входных данных, которые представляют собой направляющую кривую для моста [5]. Однако использование инструмента Grasshopper значительно упростило этот процесс, предлагая широкий спектр плагинов и графических компонентов, которые просты в использовании и позволяют избежать работы с текстовыми командами. При параметрическом моделировании разработчик скрипта предоставляет входные параметры. Благодаря этим входным данным модель получает всю необходимую информацию для создания геометрии и последующего выполнения всех анализов и вычислений. Чтобы ускорить процесс, геометрия сложной конструкции может быть разделена на основной мост, подъездные мосты и вспомогательную конструкцию. Однако существует также визуальная модель, которая объединяет все отдельные секции. После разработки всех компонентов конструкции пользователь может решить, как оптимизировать дизайн. Эта процедура оптимизации в конечном итоге приведет к созданию предварительного проекта с наименьшими затратами и экологическим эффектом.

#### Моделирование параметрической фермы

Чтобы усовершенствовать конструкцию за счет интеграции информации и параметрического моделирования, в качестве объекта исследования была выбрана пролетная конструкция моста Яданатеинга. Расположенный, в центральной части Мьянмы, в Мандалае, мост имеет общую длину 756 м, включая два подъездных пролета с обоих концов. Сооружение имеет три непрерывные двухпролетные конфигурации и построено в виде ферменного моста шириной 8,5 м, который обеспечивает двустороннее движение транспортных средств. Длина подъездной дороги со стороны Синт-Ку составляет 60 м, а длина подъездной дороги со стороны Кьяук-Мьянга – 20 м. На мосту также есть пешеходные дорожки шириной в один метр с каждой стороны. Этот мост соединяет городок Синт-Ку в округе Мандалай с городком Кьяук-Мьянг в округе Сагаинг. На рис. 1 показан профиль моста Яданатеинга.

Сценарии с использованием алгоритмов для пролетных строений моста Яданатеинга разрабатываются в Grasshopper путем определения целей проектирования и спецификаций, таких как форма, размеры и свойства материала, а затем модель передается в Tekla Structures по прямой ссылке Grasshopper-Tekla Structures. Tekla Structures автоматически обновляет всю структуру с учетом изменений в дизайне, не требуя от пользователя ничего, кроме ввода параметров в Rhino Grasshopper. Такой подход не только ускоряет разработку ферменных конструкций, но и позволяет проводить динамические изменения и оптимизацию на основе различных параметров.

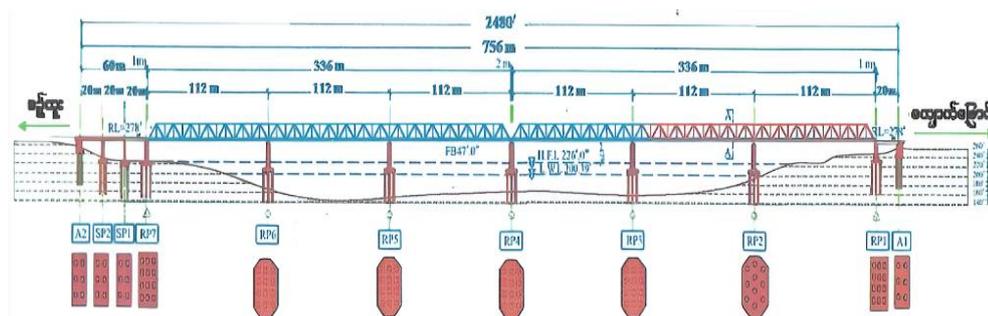


Рис. 1. Профиль моста Яданатеинга  
Fig. 1. Yadanatheinga bridge profile

Чтобы разработать основанный на алгоритмах сценарий для ферменной конструкции в Grasshopper, необходимо определить проектные параметры, такие как длина пролета, высота фермы и количество панелей, которые послужат основой для процесса проектирования [6]. Затем нужно создать базовую линию для представления пролетного строения моста и с помощью компонента «Разделительная кривая» разделить его на панели, добавив вертикальные опоры на каждом участке. Верхняя и нижняя хорды фермы создаются путем соединения вертикальных опор с помощью компонента «Линия» после создания схемы фермы. Для получения оптимального сочетания производительности и эффективности использования материалов необходимо отрегулировать конструктивные параметры, используя методы визуализации информации и оптимизации. Завершается процесс документированием и окончательной настройкой скрипта Grasshopper, созданием удобного интерфейса для регулировки параметров и подготовкой выходных данных для программы Rhino, результатом которых будет оптимизированная конструкция ферменного моста.

Для ввода параметрических данных для моста Яданатеинга авторы разработали параметрическую стальную ферму, используя интерфейс Grasshopper (рис. 2). Ферменная конструкция позволяет изменять ряд параметров, контролируемых пользователем, включая ширину, высоту и систему крепления фермы; в сочетании эти параметры, заданные пользователем, формируют конструкцию моста. Поскольку атрибуты связаны, модель изменяется автоматически. Чтобы изменить систему крепления фермы, высоту и ширину настила, пользователю достаточно ввести данные и выбрать направляющую для отображения моста.

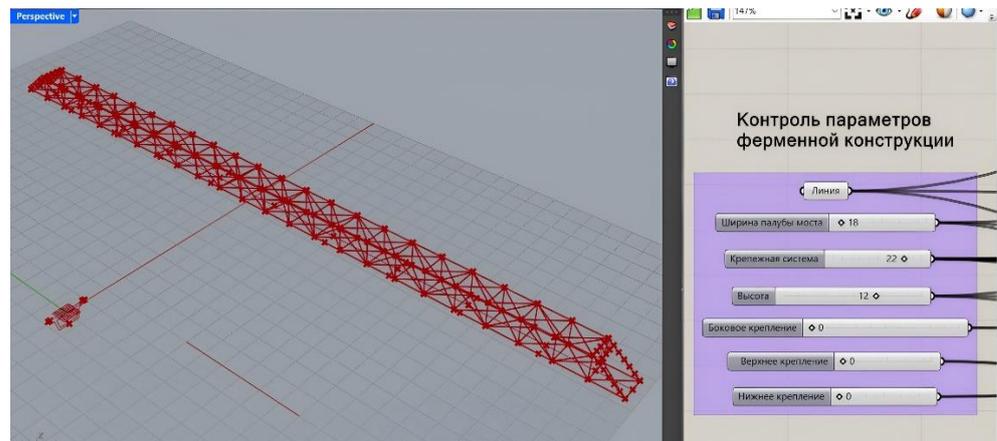


Рис. 2. Параметрическая ферма моста Яданатеинга  
Fig. 2. Parametric truss of the Yadanatheinga bridge

При моделировании ферменного моста плагин для Tekla Structures в Grasshopper предоставляет возможность выбора стальных профилей, широко используемых в мостостроении. Выбор профиля и его установка (положение, поворот и атрибуты) также могут быть сгенерированы параметрически. На рис. 3 показан пример стальных профилей и монтажа фермы. Алгоритмы для каждого элемента фермы разработаны с использованием специальных плагинов, и, поскольку атрибуты подключены, модель изменяется автоматически. Затем выбранные стальные профили можно привязать к определенным частям ферменной конструкции, и любые последующие изменения конструкции будут автоматически обновляться в связанных программах (рис. 4).



Рис. 3. Стальные профили из плагина Tekla Structures  
Fig. 3. Steel sections from the Tekla Structures plug-in

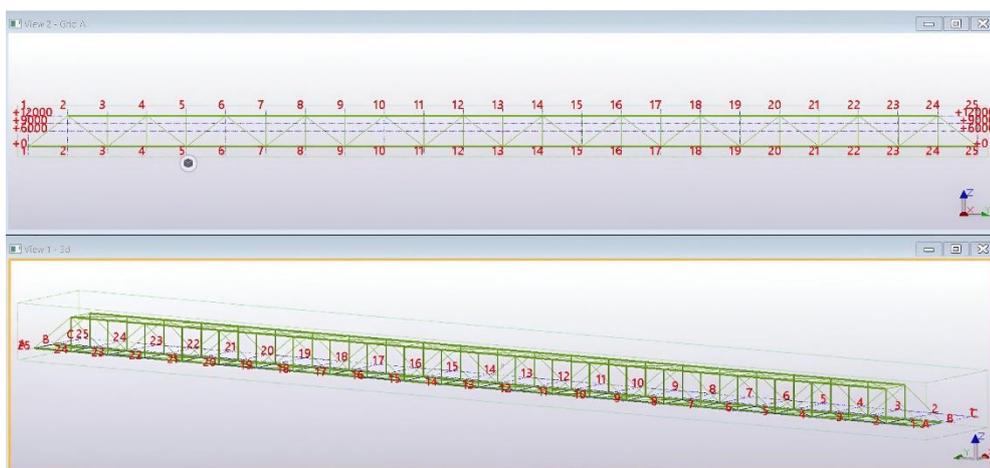


Рис. 4. Изменения в дизайне автоматически обновляются в Tekla Structures  
 Fig. 4. Design changes are automatically updated in Tekla Structures

### Структурный анализ и дальнейшая детализация в среде BIM

При выборе наиболее подходящего варианта необходимо провести проектные расчеты [7]. При проведении структурного анализа мостов в среде BIM необходимо учитывать несколько ключевых факторов для обеспечения точности и сотрудничества между участниками. Следует применять интегрированный метод моделирования, который включает в себя все ключевые компоненты, надлежащим образом отражающие поведение и проблемы в реальном мире. Также важно использовать исчерпывающие данные о нагрузках, включая различные типы нагрузок, соответствующие отраслевым нормам и стандартам. Геотехнические данные и точные свойства материалов, а также динамический анализ также необходимы для точного анализа реакции моста на динамические нагрузки. Кроме того, возможность беспрепятственного взаимодействия с другими аналитическими инструментами повышает общую эффективность структурного анализа, что приводит к созданию более безопасных и надежных конструкций моста. Результаты анализируются для определения соответствия стандартам безопасности и эксплуатационным характеристикам, что приводит к потенциальным улучшениям конструкции. После завершения строительства BIM-модель обновляется, чтобы отразить условия на этапе строительства, что делает ее полезным инструментом управления активами для будущих работ по техническому обслуживанию и обследованию. Такой комплексный подход не только повышает точность и эффективность проектирования, но и способствует экологичности за счет точного выбора материалов и новых инженерных подходов.

В настоящее время довольно распространено проведение анализа мостовых конструкций с использованием метода конечных элементов (МКЭ) [8]. Для расчета ферменных мостов на прочность чаще всего используются программные пакеты Tekla Structural Designer, Midas Civil, ABAQUS и др. [9]. Информационную модель из Tekla Structures можно экспортировать в различные форматы для анализа. Прежде чем приступить к расчетам, необходимо определить,

какие части должны быть рассчитаны. Затем модель экспортируется в приложение для расчета и выполнения вычислений. При необходимости проектировщик может внести некоторые изменения и повторить анализ.

Чтобы изучить реакцию пролетного строения моста Яданатеинга, был проведен анализ ферменной конструкции с использованием Midas Civil, который поддерживает ВМ и МКЭ-анализ. Он широко применяется для анализа и проектирования строительных конструкций, таких как мосты, здания и геотехнические работы, позволяя пользователям создавать подробные геометрические модели с использованием заранее определенных шаблонов или импорта САПР. Он анализирует конструкции, разбивая их на более мелкие элементы и решая сложные уравнения, прогнозируя их поведение при различных нагрузках. Кроме того, его интеграция с ВМ обеспечивает совместные рабочие процессы между инженерами и другими заинтересованными сторонами, улучшая коммуникацию и координацию на протяжении всего жизненного цикла проекта.

В рамках настоящего исследования все элементы фермы выполнены из стали, а материалы модели имеют те же характеристики, что и реальные конструкционные материалы. Также могут быть заданы различные свойства материала и нагрузки. Возможно задание различных свойств материалов и типов нагрузок. Собственная масса конструкции (гравитационная нагрузка) рассматривается как постоянная нагрузка (DL), включающая в себя вес основных элементов надстройки. Вес фермы верхнего строения учитывался в расчетах для каждого узла и элемента конструкции (рис. 5). Геометрия модели была основана на исходных строительных чертежах. Граничные условия соответствовали проектным параметрам. В табл. 2 приведены результаты анализа реакции опоры.

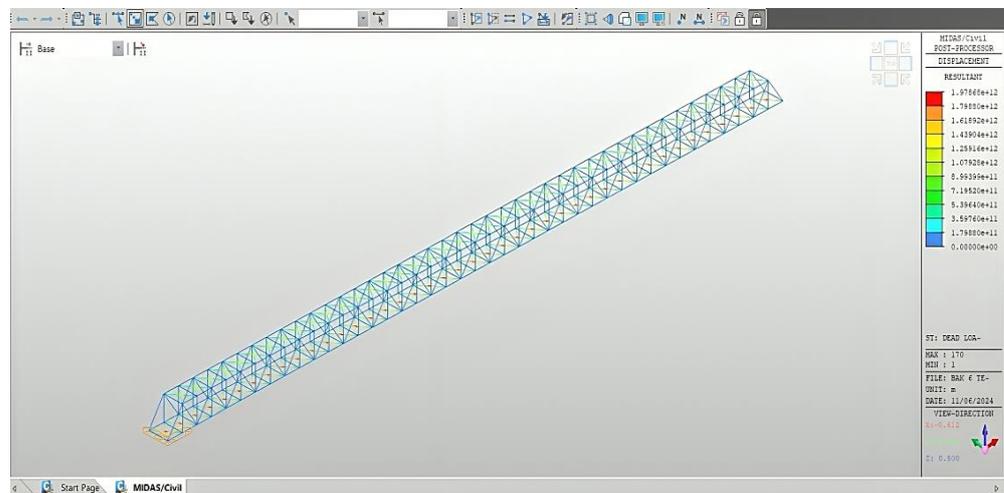


Рис. 5. Результаты расчета моста Яданатеинга в Midas Civil

Fig. 5. FEM of the Yadatheinga bridge in Midas Civil

Для улучшения взаимодействия с программой может быть разработан плагин, использующий открытый API для выполнения расчетов основных конструкций в Tekla и последующего импорта полученных данных в программы анализа

прочности. Плагин автоматически создает различные слои для каждого элемента, позволяя пользователю легко настраивать модель расчета в комплексе прочности. Работа с алгоритмизированным проектированием дает дизайнерам возможность преодолеть ограничения стандартного программного обеспечения САПР и инструментов компьютерной 3D-графики, достигнув уровня сложности, превышающего стандартные возможности взаимодействия человека с цифровыми объектами [10]. Для эффективного использования этих возможностей оператору необходимо обладать знаниями основ языков программирования, таких как C# или Python. Python отличается простотой в освоении и подходит для применения в областях, связанных с машинным обучением. C# более эффективен при работе с широким спектром архитектурных, конструкторских и программных решений, а также при создании собственных приложений.

Таблица 2

**Результаты анализа реакции опоры в Midas Civil**

Table 2

**Support resistance in Midas Civil**

Узел	$F_x$ , kN	$F_y$ , kN	$F_z$ , kN	$M_x$ , kN·m	$M_y$ , kN·m	$M_z$ , kN·m
1	428,910	22,856	410,808	0	0	0,198
15	-429,703	213,786	1142,779	0	0	-0,321
29	429,703	213,786	1142,779	0	0	0,321
43	-428,910	22,856	410,808	0	0	-0,198
86	430,611	-20,971	415,412	0	0	-0,186
100	-428,001	-215,671	1138,175	0	0	0,334
114	428,001	-215,671	1138,175	0	0	-0,334

Интеграция современных технологий в проектирование, строительство и эксплуатацию транспортной инфраструктуры позволяет находить эффективные и оптимальные решения на любом этапе жизненного цикла сооружения [11, 12]. Операторы и проектировщики могут снизить вероятность возникновения ошибок, используя плагин для объединения специализированного программного обеспечения с информационным моделированием. Таким образом, применяя подключаемые модули для объединения специализированного программного обеспечения с информационным моделированием, операторы и проектировщики могут свести к минимуму вероятность возникновения ошибок и оптимизировать процесс проектирования. Внедрение дополнительных программ и плагинов облегчает создание информационной модели моста, а также выполнение необходимых вычислений на любом этапе эксплуатации объекта с учетом результатов мониторинга.

**Заключение**

В проведенном исследовании использовались скрипты визуального программирования в среде Grasshopper для разработки комбинированного подхода

параметрического и информационного моделирования для пролетного строения моста Яданатеинга в Мьянме. Эта модель впоследствии интегрируется с гибкой генеративной моделью в программе Tekla Structures. Расчеты на прочность выполняются путем экспорта информационной модели в Midas Civil. Возможность быстрой разработки и модификации модели путем изменения ее параметров является важной особенностью параметрического моделирования, позволяющей оперативно менять конструкцию на протяжении всего процесса проектирования и строительства. Учет и управление связями между многочисленными элементами дизайна является основным направлением параметрического моделирования в среде BIM. Каждый элемент дизайна при этом способен влиять на другие, что приводит к созданию сети взаимосвязанных параметров.

Создание алгоритмизированного сценария для ферменного моста в среде Grasshopper включает в себя несколько систематических процессов, которые отражают концепции проектирования. Комбинация параметрического и информационного моделирования позволяет пользователю определить оптимальный тип конструкции исходя из представленных требований, что свидетельствует о том, что модель не ограничивается одним вариантом решения. Поскольку традиционное проектирование требует многократного повторения однотипных процедур, внедрение этого подхода может сократить продолжительность процесса проектирования, уменьшить затраты и энергопотребление. Более того, как только модель моста в Grasshopper будет готова, ее можно будет сохранить в качестве шаблона для будущих проектов, связав с базой данных. Такой метод позволяет эффективно создавать мосты сложной геометрии и облегчает оптимизацию проектных параметров, что в конечном счете сокращает время и ресурсы, необходимые для проектирования и анализа.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вин Ко Мьинт Ту, Смирнова О.В. Особенности влияния технического состояния транспортных сооружений на обеспечение транспортной безопасности грузоперевозок Республики Мьянма // Интеллектуальные транспортные системы : материалы III Международной научно-практической конференции. Москва, 2024. С. 547–554. DOI: 10.30932/9785002446094-2024-547-554
2. Mya San Wai. Robustness Evaluation of Long Span Truss Bridge Using Damage Influence Lines : Doctoral dissertation. Kyoto, Japan, 2020. DOI: 10.14989/doctor.k22417
3. Smirnova O.V., Smirnov K.V. Creating automation tools with BIM-programs for designing elements of metal bridges // Proceedings of the 2017 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies», IT and QM and IS 2017. St. Petersburg, Russia, 2017. P. 773–775. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8085940>
4. Смирнова О.В., Чжо Зин Аунг. Возможности адаптации программы Tekla при проектировании элементов металлических мостов // Транспортное строительство. 2017. № 10. С. 20–21. DOI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34957184>
5. Sardone L., Greco R., Fiore A., Moccia C., Tommasi D., Lagaros N.D. A preliminary study on a variable section beam through Algorithm-Aided Design: A way to connect architectural shape and structural optimization // The 1st International Conference on Optimization-Driven Architectural Design (OPTARCH 2019). P. 497–504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.264>
6. Вин Ко Мьинт Ту. Возможности и преимущества использования параметрических скриптов в информационном моделировании мостовых сооружений // Транспортное строительство. 2024. № 2. С. 27–29. DOI: [https://tc-journal.ru/issues/tc\\_issue-02\\_2024.php](https://tc-journal.ru/issues/tc_issue-02_2024.php)
7. Перельмутер А.В., Криксунов Э.З., Карпиловский В.С., Маляренко А.А. Интегрированная система для расчета и проектирования несущих конструкций зданий и сооружений SCAD

- Office. Новая версия, новые возможности // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 2 (4). С. 10–12. DOI: <https://engstroy.spbstu.ru/article/2009.4.1/>
8. Valentina B., Laura S., Luis A., Bohórquez G., Davide M., Giuseppe C.M., Marco D. Algorithm-Aided Design for Composite Bridges // *Buildings*. 2023. V. 13. I. 4. P. 865. DOI: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/4/865>
  9. Smirnova O.V., Kyaw Zin Aung. The Adaptation of Information Modeling Software for the Metal Truss Bridges Design and Utilize Bridges // *Proceedings of the IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS)*. St. Petersburg, Russia, 2018. P. 491–494. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8525130>
  10. Rahinah Ibrahim, Farzad Pour Rahimian. Comparison of CAD and manual sketching tools for teaching architectural design // *Automation in Construction*. 2010. V. 19. I. 8. December. P. 978–987. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.003>
  11. Gaoa G., Liua Y., Lina P., Wang M., Gua M., Yonga J. BIM Tag; Concept-based automatic semantic annotation of online BIM product resources // *Advanced Engineering Informatics*. 2017. № 31. P. 48–61. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1474034615001068>
  12. Xichen Chen, Alice Chang-Richards, Anthony Pelosi, Yaodong Jia. Implementation of technologies in the construction industry: a systematic review // *Engineering Construction & Architectural Management*. 2022. V. 29. № 8. P. 3181–3209. DOI: <https://doi.org/10.1108/ECAM-02-2021-0172>

#### REFERENCES

1. Win Ko Myint Thu, Smirnova O.V. Influence of Technical Conditions of Transport Facilities on Cargo Transportation Safety in the Republic of Myanmar. In: *Proc. 3rd Int. Sci. Conf. 'Intelligent Transport Systems'*, Moscow. May 30, 2024, Pp. 547–554. DOI: 10.30932/9785002446094-2024-547-554 (In Russian)
2. Mya San Wai. Robustness Evaluation of Long Span Truss Bridge using Damage Influence Lines. DSc Thesis. 2020, Kyoto, Japan. DOI: 10.14989/doctor.k22417
3. Smirnova O.V., Smirnov K.V. Creating Automation Tools with BIM-Programs for Designing Elements of Metal Bridges. In: *Proc. 2017th Int. Conf. 'Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies'*, Saint-Petersburg, Russia, 2017. Pp. 773–775. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8085940>
4. Smirnova O.V., Kyaw Zin Aung. Adaptation of Tekla Program to Design of Metal Bridge Elements. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2017; (10): 20–21. DOI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34957184> (In Russian)
5. Sardone L., Greco R., Fiore A., Moccia C., Tommasi D., Lagaros N.D. A Preliminary Study on a Variable Section Beam Through Algorithm-Aided Design: A Way to Connect Architectural Shape and Structural Optimization. In: *Proc. 1st Int. Sci. Conf. on Optimization-Driven Architectural Design*, 2019. Pp. 497–504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.264>
6. Win Ko Myint Thu. Parametric Scripts in Information Modeling of Bridges. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2024; (10): 27–29. DOI: [https://tc-journal.ru/issues/tc\\_issue-02\\_2024.php](https://tc-journal.ru/issues/tc_issue-02_2024.php) (In Russian)
7. Perelmuter A.V., Kriksunov E.Z., Karpilovsky V.S., Malyarenko A.A. SCAD Office Integrated System for Calculation and Design of Load-Bearing Structures of Buildings. New Version, New Features. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2009; (2): 10–12. (In Russian)
8. Valentina B., Laura S., Luis A., Bohórquez G., Davide M., Giuseppe C.M., Marco D. Algorithm-Aided Design for Composite Bridges. *Buildings*. 2023; 13 (4): 865. <https://doi.org/10.3390/buildings13040865>
9. Smirnova O.V., Kyaw Zin Aung. The Adaptation of Information Modeling Software for the Metal Truss Bridges Design and Utilize Bridges. In: *Proc. IEEE Int. Conf. 'Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies'*. Saint-Petersburg, Russia, 2018. Pp. 491–494. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8525130>
10. Rahinah Ibrahim, Farzad Pour Rahimian. Comparison of CAD and Manual Sketching Tools for Teaching Architectural Design. *Automation in Construction*. 2010; 19 (8): 978–987. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.003>

11. Gaoa G., Liua Y., Lina P., Wanga M., Gua M., Yonga J. BIM Tag; Concept-Based Automatic Semantic Annotation of Online BIM Product Resources. *Advanced Engineering Informatics*. 2017; (31): 48–61. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1474034615001068>
12. Xichen Chen, Alice Chang-Richards, Anthony Pelosi, Yaodong Jia. Implementation of Technologies in the Construction Industry: A Systematic Review. *Engineering Construction & Architectural Management*. 2022; 29 (8): 3181–3209. DOI: <https://doi.org/10.1108/ECAM-02-2021-0172>

#### Сведения об авторах

Смирнова Ольга Владимировна, канд. техн. наук, доцент, Российский университет транспорта (РУТ/МИИТ), 127055, г. Москва, ул. Образцова, 9, o\_v\_smirnova@mail.ru

Вин Ко Мьинт Ту, аспирант, Российский университет транспорта (РУТ/МИИТ), 127055, г. Москва, ул. Образцова, 9, winkomyinthu@mail.ru

#### Authors Details

Olga V. Smirnova, PhD, A/Professor, Russian University of Transport, 9, Obraztsov Str., 127055, Moscow, Russia, o\_v\_smirnova@mail.ru

Win Ko Myint Thu, Research Assistant, Russian University of Transport, 9, Obraztsov Str., 127055, Moscow, Russia, winkomyinthu@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 08.11.2024  
Одобрена после рецензирования 22.11.2024  
Принята к публикации 26.11.2024

Submitted for publication 08.11.2024  
Approved after review 22.11.2024  
Accepted for publication 26.11.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 6. С. 201–213.

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 (6): 201–213.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 620.178.311.62

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-201-213

EDN: VKRYUG

### ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ СТАЛЕБЕТОННЫХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПРОДОЛЬНОЙ СИЛЫ

Владимир Иванович Ерофеев<sup>1</sup>, Павел Алексеевич Хазов<sup>2</sup>,  
Ирина Васильевна Шкода<sup>1,2</sup>, Александр Сергеевич Торопов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем машиностроения РАН –  
филиал Института прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Нижегородский государственный  
архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород, Россия

**Аннотация.** *Актуальность.* Изучение свойств материалов под воздействием динамических нагрузок является важным аспектом для проведения сложных инженерных расчетов. Исследования влияния динамических нагрузок на сталебетонные конструкции приведут к разработке новых методов расчета и проектирования таких конструкций.

*Цель* исследования – изучить влияние продольной силы на динамическое поведение сталебетонного образца при различных мощностях динамического воздействия.

В исследовании применяются *методы экспериментального моделирования* при помощи современных измерительных устройств и последующая *аналитическая обработка* полученных результатов.

*Научная новизна* заключается в проведении экспериментального исследования динамического поведения сталебетонного образца при действии гармонической нагрузки различной мощности и характера приложения с учетом поэтапно увеличивающейся продольной сжимающей силы.

*В результате* исследования определены коэффициент затухания колебаний, коэффициент неупругой работы, необходимые при расчете динамических систем в околорезонансных зонах. Также приведены графики зависимости частоты свободных колебаний и амплитуды колебаний от величины продольной сжимающей силы и мощности импульса.

*Практическая значимость* работы заключается в возможности использования результатов исследования для разработки новых методов расчета и проектирования сталебетон-

ных конструкций, а также оснащения баз данных программ численного моделирования информацией о свойствах сталебетона посредством натуральных испытаний.

**Ключевые слова:** динамические возмущения, продольная сила, сталебетон, гармонические колебания, частота колебаний, акселерометр

**Финансирование:** работа выполнена в рамках государственного задания ИПМ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2024–2026 годы (тема ФФУФ-2024-0031, № 1023032800130-3-2.3.2).

**Для цитирования:** Ерофеев В.И., Хазов П.А., Шкода И.В., Торопов А.С. Динамические реакции сталебетонных стержней при гармонических нагрузках при действии продольной силы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 201–213. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-201-213. EDN: VKRYUG

## ORIGINAL ARTICLE

### DYNAMIC RESPONSE OF STEEL-CONCRETE BARS AT HARMONIC AND LONGITUDINAL LOADS

Vladimir I. Erofeev<sup>1</sup>, Pavel A. Khazov<sup>2</sup>, Irina V. Skoda<sup>1,2</sup>, Aleksandr S. Toropov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Research Institute RAS, Institute of Applied Physics RAS Affiliate, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup>Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** Material properties under dynamic loads are important to calculate for engineering applications. Investigation of dynamic loads of steel-concrete structures requires the development of new calculation and design techniques.

**Purpose:** The aim of the paper is to investigate the effect of longitudinal force on the dynamic behavior of steel-concrete bars under different dynamic loads.

**Methodology:** Experimental modelling based on up-to-date measuring devices and analytical processing of the obtained results.

**Research findings:** Vibration damping and inelastic work coefficients are determined for the dynamic system analysis in near-resonance zones. Dependences are suggested for the free oscillation frequency and amplitude, and the longitudinal compressive force and pulse power.

**Practical implications:** The results obtained can be used to develop new calculation and design techniques for steel-concrete structures and numerical simulation program data seed with steel-concrete properties through field tests.

**Originality:** Experimental research into the dynamic behavior of steel-concrete bars under different harmonic loading with regard to a stepwise increase of the longitudinal compressive force.

**Keywords:** steel-concrete, harmonic oscillations, longitudinal force, dynamic perturbations, oscillation frequency, accelerometer

**Funding:** The work was carried out within the state assignment to IAP RAS for fundamental scientific research for 2024-2026 (topic FFUF-2024-0031, No 1023032800130-3-2.3.2).

**For citation:** Erofeev V.I., Khazov P.A., Shkoda I.V., Toropov A.S. Dynamic Response of Steel-Concrete Bars at Harmonic and Longitudinal Loads. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and

Architecture. 2024; 26 (6): 201–213. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-201-213.  
EDN: VKRYUG

### Введение

В современном строительстве и технике широко распространены упругие конструкции сооружений, машин, технических устройств, испытывающие в реальных условиях колебания от различного рода динамических возмущений. В качестве материала таких конструкций благодаря своей прочности, долговечности и экономической эффективности может быть использован сталебетон. При проектировании подобных конструкций важно учитывать их динамическое поведение под воздействием различных нагрузок, особенно при гармонических воздействиях. Значительное влияние на динамический отклик сталебетонных стержней, а именно на частоту свободных колебаний, при воздействии на конструкцию поперечных возмущений оказывает продольная сила, приложенная к ней.

В настоящей статье рассматривается характер влияния этого фактора на динамическое поведение сталебетонного образца при различных мощностях динамического воздействия.

На данный момент существует большое количество работ, в основном посвященных изучению проблемы сопротивления динамическому возмущению железобетонных и стальных конструкций [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9], в то время как работ, исследующих сталебетонные конструкции, крайне мало [10, 11], что является ограничивающим фактором для развития и применения сталебетона, несмотря на его потенциал и преимущества в инженерных конструкциях. Более глубокое изучение сталебетона поможет раскрыть возможности материала и способы оптимизации его использования.

### Материалы и методы исследования

Испытания сталебетонного образца проводились в 3 этапа.

1. Статические испытания при действии осевой сжимающей нагрузки для определения критической силы потери устойчивости [12].

2. Динамические испытания центрально-сжатых образцов при действии однократно приложенного импульса.

3. Динамические испытания центрально-сжатых образцов при вынужденных колебаниях от действия многократно приложенного импульса.

На всех этапах экспериментальных исследований сталебетонный образец, состоящий из обоймы (стальная прямошовная электросварная труба) и сердечника (искусственный камень из цементно-песчаного раствора марки М100) длиной 700 мм и диаметром 76 мм, закреплялся шарнирно с двух концов в установке для статического нагружения сжимающей нагрузкой.

Общий вид схемы установки для испытания на воздействие однократного импульса представлен на рис. 1. В ходе испытания к свободному концу двутавровой балки 1 подвешивалась корзина 5, на которую поэтапно подавалась сжимающая нагрузка 6. Суммарная сжимающая нагрузка на образец не превышала его несущую способность, определенную на первом этапе исследований [12].

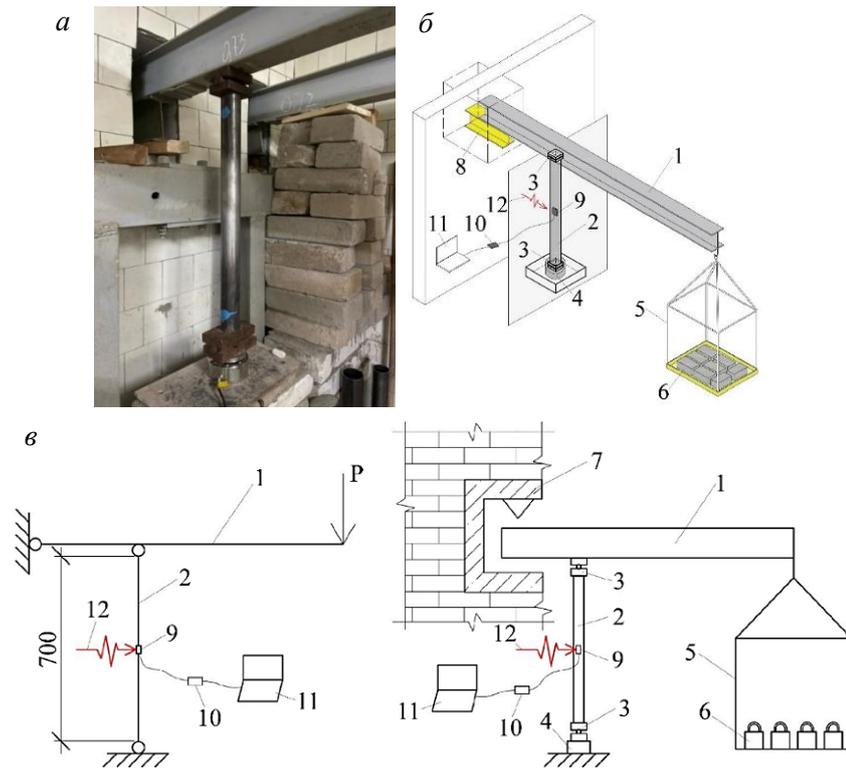


Рис. 1. Испытания центрально-сжатых образцов на определение собственных колебаний: а – общий вид; б – аксонометрическая схема экспериментальной установки; в – плоская схема и расчетная модель: 1 – загружающий рычаг; 2 – испытуемый образец; 3 – цилиндрический опорный шарнир; 4 – силомер; 5 – корзина; 6 – гири; 7 – усиленный ж/б пояс; 8 – страховочная конструкция; 9 – блок акселерометра; 10 – модуль обработки сигнала акселерометра; 11 – ноутбук для регистрации осциллограмм и результатов измерений вибрации; 12 – ударник для импульсного воздействия

Fig. 1. Axial compression of bars to determine natural vibrations: а – general view; б – axonometric view of the experimental setup; в – plane view and calculation model: 1 – loading lever; 2 – test specimen; 3 – cylindrical support joint; 4 – force meter; 5 – basket; 6 – weights; 7 – reinforced concrete binding strake; 8 – safety structure; 9 – accelerometer; 10 – accelerometer signal processing module; 11 – laptop for recording oscillograms and vibration measurements; 12 – impulse impact hammer

На всех ступенях загрузки возбуждение поперечных колебаний производилось с помощью пружинного ударника 12. Датчик акселерометра 9, прикрепленный в центре образца, снимал проекции кажущегося ускорения после каждого удара.

При однократном приложении импульса в образце возникают собственные колебания, при этом уравнение движения акселерометра можно записать через закон движения свободных колебаний:

$$y(t) = A \cdot e^{-\beta t} \cos(\omega t), \quad (1)$$

где  $A$  – начальная амплитуда колебаний, м;  $\beta$  – коэффициент затухания,  $c^{-1}$ ;  $\omega$  – круговая частота, рад/с;  $t$  – время, с.

График затухающих колебаний, возбуждаемых при однократном импульсе, показан на рис. 2.

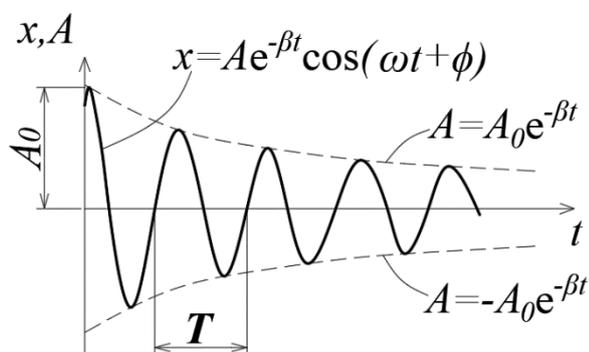


Рис. 2. График свободных затухающих колебаний:

$\beta = \text{const}$  – коэффициент затухания;  $A = A_0 e^{-\beta t}$  – амплитуда затухающих колебаний;  $A_0$  – начальная амплитуда;  $T$  – период затухающих колебаний

Fig. 2. Free damping vibrations:

$\beta = \text{const}$  – damping coefficient;  $A = A_0 e^{-\beta t}$  – amplitude of damping vibrations;  $A_0$  – initial amplitude;  $T$  – period of damped periodic vibrations

Логарифмический декремент затухания  $\beta$  в уравнении (1) вычисляется по формуле

$$\beta = \bar{\beta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{0,2}{T} \ln \frac{x_j}{x_{j+5}} \right)_i, \quad (2)$$

где  $x_j$  – текущее пиковое значение перемещения, м;  $x_{j+5}$  – пятое по счету пиковое значение перемещения, отсчитываемое от  $x_j$ , м;  $n$  – количество пиковых значений перемещений, взятых для определения коэффициента затухания;  $T$  – период, с.

Коэффициент затухания вычисляется как среднее значение из нескольких логарифмических декрементов затухания, при этом учитывается отношение амплитуд колебаний, взятых с интервалом в пять периодов, что объясняет коэффициент 0,2 в формуле (2).

Важным параметром колебаний является коэффициент неупругой работы материала, влияющий на поведение системы в околорезонансных зонах. Данный параметр, являющийся константой материала и не зависящий от внутреннего напряжения образца, вычисляется по формуле

$$\gamma = \frac{2\beta}{\omega} = \frac{\beta T}{\pi}. \quad (3)$$

Третий этап экспериментальных исследований был проведен для оценки влияния продольной силы на демпфирующие свойства сталебетона при воздействии на образец многократных импульсов разной мощности. Схема установки для анализа динамического отклика представлена на рис. 3.

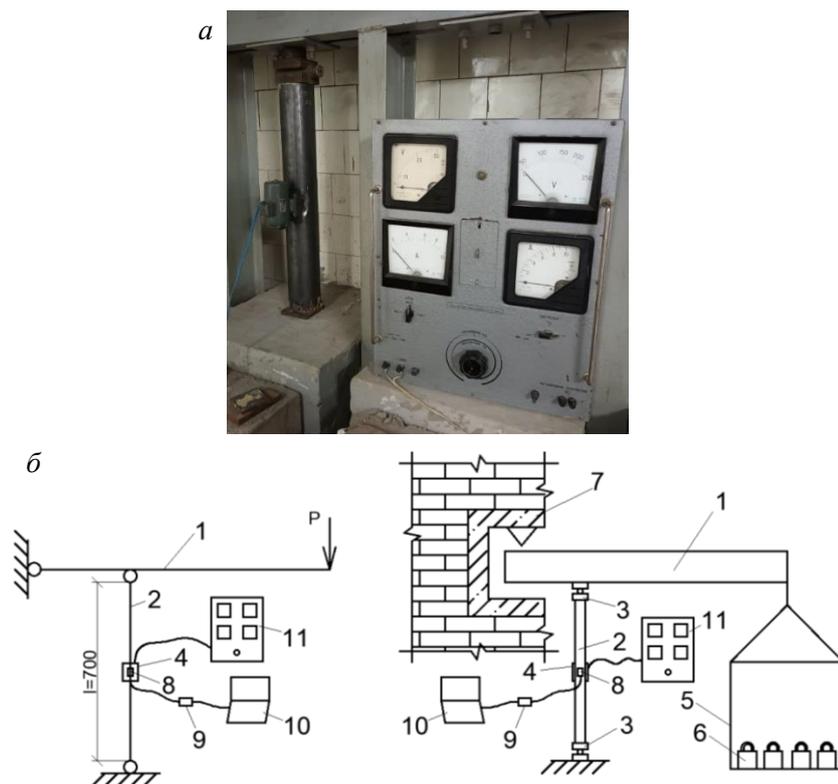


Рис. 3. Испытания сжатых образцов на определение собственных колебаний при изменении величины продольной силы:

*a* – общий вид установки; *б* – плоская схема и расчетная модель: 1 – загружающий рычаг; 2 – испытуемый образец; 3 – цилиндрический опорный шарнир; 4 – электродвигатель с эксцентричным диском; 5 – корзина; 6 – гири; 7 – усиленный ж/б пояс; 8 – блок акселерометра; 9 – модуль обработки сигнала акселерометра; 10 – ноутбук для регистрации осциллограмм и результатов измерений вибрации; 11 – распределительный щит с вольтметром

Fig. 3. Compressive tests of bars to determine natural vibrations at different longitudinal force: *a* – general view; *b* – plane view and calculation model: 1 – loading arm; 2 – test specimen; 3 – cylindrical support joint; 4 – electric motor with eccentric disk; 5 – basket; 6 – weights; 7 – reinforced concrete binding strake; 8 – accelerometer; 9 – accelerometer signal processing module; 10 – laptop for recording oscillograms and vibration measurements; 11 – switchboard with voltmeter

Используемая для экспериментального исследования установка устроена аналогично установке со второго этапа исследования на приложение одиночного импульса. Сжимающая нагрузка на образец 2 подавалась поэтапно путем прибавления количества гирь 6, укладываемых на корзину 5, подвешенную к концу двутавровой балки 1. На образец оказывалось поперечное воздействие с помощью электродвигателя с эксцентричным диском 4 с различной мощностью (80, 100, 120 Вт). После возмущения колебаний акселерометр 9, датчик которого прикреплен к середине стержня, регистрировал проекции кажущегося ускорения. В данном исследовании использовался трехосный акселерометр ТБА с массой около 50 г, что не оказало влияния на чистоту эксперимента.

В соответствии с программой эксперимента сжимающая нагрузка изменялась в диапазоне от 0 до 1000 кг. Измерения начинались с продольной силы, равной собственному весу корзинки 5, в каждом последующем измерении масса корзинки увеличивалась на 200 кг, что соответствует одному ряду гирь.

Под действием поперечной внешней силы  $F_0 \cos \omega t$  образец начинает испытывать вынужденные колебания. При этом смещение колеблющейся точки после возбуждения описывается уравнением

$$x = A \cos(\omega t + \beta), \quad (4)$$

где  $A$  – начальная амплитуда колебаний, м;  $\omega$  – круговая частота, рад/с;  $t$  – время, с;  $\beta$  – сдвиг фазы колебаний.

В данном случае амплитуда колебаний вычисляется по формуле

$$A = \frac{F_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \alpha^2 \omega^2}}, \quad (5)$$

где  $\omega_0$  – собственная круговая частота колебаний, рад/с;  $\alpha$  – коэффициент сопротивления среды.

Сдвиг фазы колебаний удовлетворяет уравнению

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\alpha \omega}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}, \quad (6)$$

где  $m$  – масса тела, кг.

Из формулы (5) следует, что амплитуда колебаний  $A$  зависит от частоты колебаний  $\omega$  следующим образом: при значениях  $\omega < \omega_0$  амплитуда возрастает при увеличении  $\omega$ , при  $\omega = \omega_0$  – достигает максимума и далее уменьшается. Острота резонанса будет тем более выраженной, чем меньше коэффициент сопротивления среды  $\alpha$ . При малом значении коэффициента трения резонанс разрушает систему: при  $\alpha = 0$  амплитуда колебаний на резонансной частоте стремится к бесконечности.

Результаты измерений динамических параметров образца, полученные при различных значениях приложенной продольной силы, представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Динамические параметры образца

Table 1

## Dynamic parameters

Сжимающая нагрузка, кг	Фактическая продольная сила на образце $N_{\text{факт}}$ , кН	Частота собственных колебаний $f$ , с <sup>-1</sup>		
		при мощности движка		
		80	100	120
Собственный вес корзинки с рычагом (около 17 кг)	1,3	14,051	8,225	3,529
200	6,8	14,019	10,176	5,275
400	12,8	21,463	18,396	9,733
600	18,7	29,060	16,366	11,799

Окончание табл. 1  
End of table 1

Сжимающая нагрузка, кг	Фактическая продольная сила на образце $N_{\text{факт}}$ , кН	Частота собственных колебаний $f$ , $\text{с}^{-1}$		
		при мощности движка		
		80	100	120
800	24,6	20,740	15,787	12,846
1000	30,6	11,236	8,933	15,213

### Результаты и обсуждение

В результате измерений, проведенных на втором этапе исследования при приложении одиночного импульса, были получены значения коэффициента затухания колебаний и коэффициента неупругой работы (табл. 2).

Таблица 2

### Значения коэффициента затухания и коэффициента неупругой работы

Table 2

#### Damping coefficient and inelastic behavior coefficient

Сжимающая продольная сила	$N_1 = 6,8$ кН (1 ряд)	$N_6 = 36,5$ кН (6 рядов)
Коэффициент затухания $\beta$	6,197	10,210
Коэффициент неупругой работы $\gamma$	0,139	0,129

Значение коэффициента затухания колебаний нелинейно возрастает. При этом разница в коэффициенте неупругой работы составляет не более 7 %, превышая аналогичные значения для железобетона ( $\gamma_{\text{жб}} = 0,1$ ) на 30–40 % и для стали на 8–16 % при  $\gamma_{\text{с}} = 0,12$  (рис. 4).

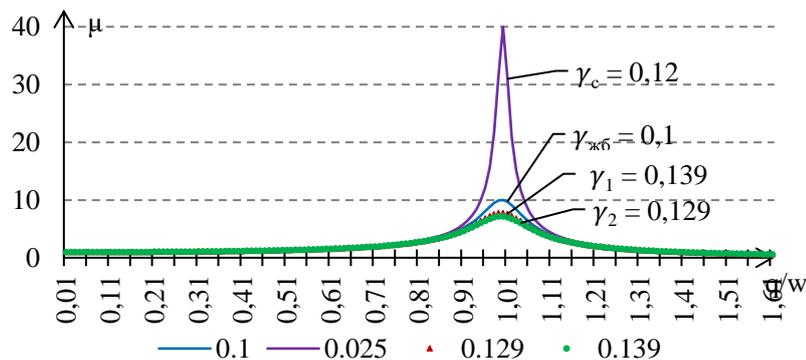


Рис. 4. График резонансных кривых различных материалов: ( $\gamma_{\text{жб}}$  – коэффициент неупругой работы железобетона;  $\gamma_{\text{с}}$  – коэффициент неупругой работы стали;  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  – коэффициент неупругой работы трубобетона)

Fig. 4. Resonance curves of different materials: ( $\gamma_{\text{жб}}$  – inelastic behavior coefficient of reinforced concrete,  $\gamma_{\text{с}}$  – inelastic coefficient of steel,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  – inelastic coefficient of pipe concrete)

На основе обработки экспериментальных данных третьего этапа исследования, проведенного с использованием многократно повторяющихся импульсов, был построен график, иллюстрирующий зависимость частоты свободных колебаний образца от мощности, получаемой от электродвигателя с эксцентричным диском, при разной величине приложенной сжимающей продольной силы (рис. 5).

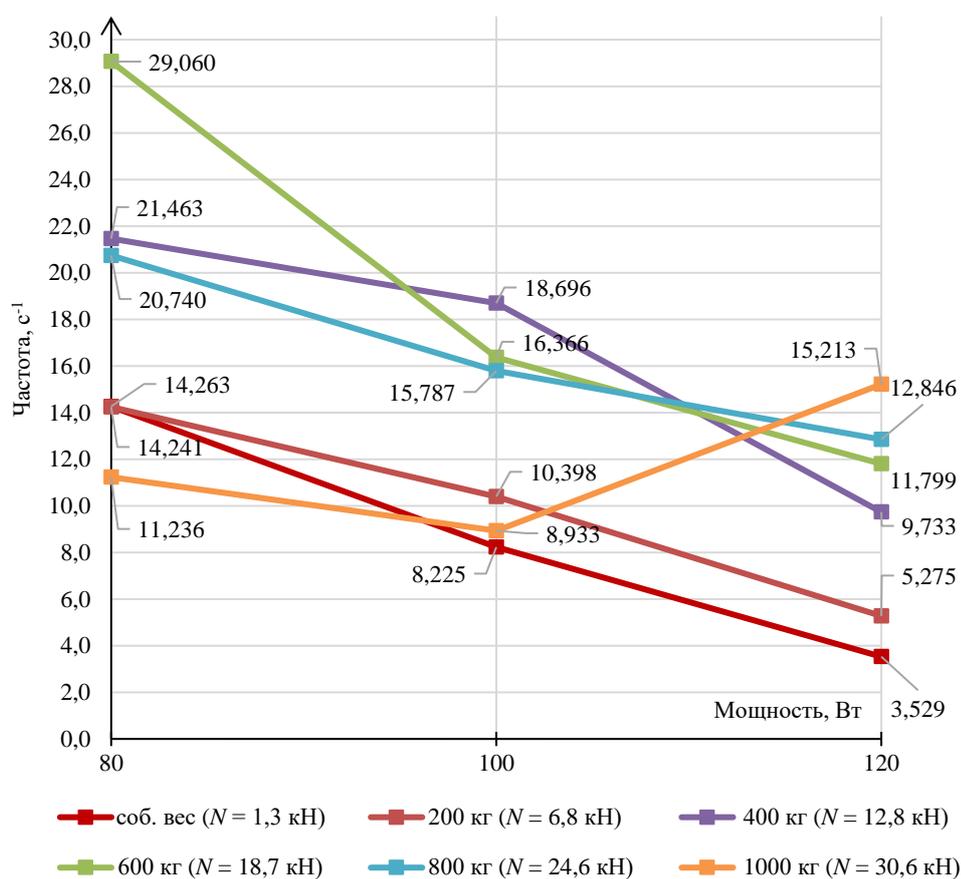


Рис. 5. Общий график зависимости частоты свободных колебаний образца от мощности при различной продольной силе

Fig. 5. Dependences between free vibrations and power at different longitudinal force

Из графика следует, что при локально фиксируемой продольной силе при повышении мощности частота колебаний образца уменьшается. Это может происходить из-за увеличения амплитуды колебаний образца (рис. 6). Данная зависимость не выполняется при величине сжимающей силы, равной массе корзины 1000 кг, соответствующей силе  $N = 30,6$  кН, при наибольшей мощности частота колебаний образца увеличилась. Наибольшую частоту колебаний имеют образцы, нагруженные продольной силой, равной 400 и 600 кг ( $N = 12,8$  и  $18,7$  кН соответственно). При продольной силе, равной собственному весу корзины, и при массе корзинки 200 кг частота колебаний наименьшая.

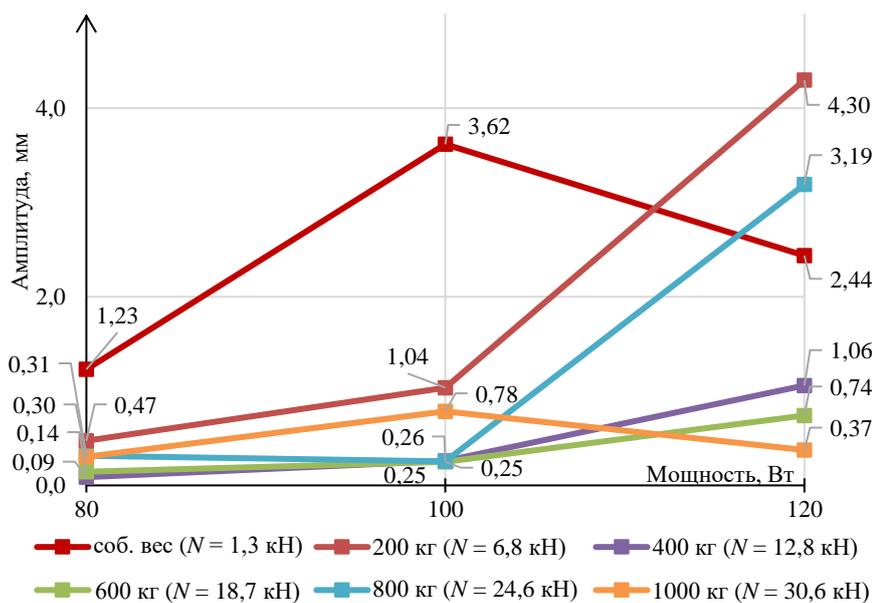


Рис. 6. Общий график зависимости амплитуды колебаний образца от мощности при различной продольной силе

Fig. 6. Dependences between vibration amplitude and power at different longitudinal force

### Заключение

В настоящей работе проведено исследование влияния продольной силы на поведение сталебетонных конструкций, из которого сделаны следующие выводы:

1. Внутреннее напряжение, вызванное сжимающей продольной силой, оказывает минимальное воздействие на коэффициент неупругой работы, следовательно, практически не влияет на демпфирующие свойства сталебетона.

2. Свойства демпфирования у сталебетонных конструкций значительно превосходят аналогичные показатели у стальных и железобетонных конструкций (на 8–16 и 30–40 % соответственно).

3. При действии многократно повторяющегося импульса поведение сталебетона зависит от соотношения частот внешних и собственных колебаний образца. При совпадении этих частот наблюдается явление резонанса, при котором амплитуда колебаний становится максимальной.

4. В данном исследовании эффект резонанса был достигнут при продольном усилии, равном 400 кг, и мощности источника вынужденных колебаний, равной 100 Вт. В последующих исследованиях планируется изучение влияния продольной силы на динамический отклик сталебетонного образца при воздействии источника колебаний различной мощности.

5. При локально фиксируемой продольной силе с увеличением мощности частота колебаний образца уменьшается при всех значениях продольной силы, кроме случая с максимальной силой сжатия, соответствующей массе 1000 кг ( $N = 30,6$  кН). В данном случае частота колебаний стала больше при увеличении мощности прикладываемого импульса.

6. Максимальная частота колебания образца регистрируется при продольной силе, равной 400 и 600 кг ( $f_{400} = 21,463 \text{ с}^{-1}$ ,  $f_{600} = 29,06 \text{ с}^{-1}$ ), при мощности вынуждаемого импульса 80 Вт.

7. Максимальная амплитуда колебания образца  $A = 4,3$  мм регистрируется при сжимающей силе, равной 200 кг, при мощности от электродвигателя с эксцентричным диском 120 Вт.

Способность сталебетона к демпфированию помогает уменьшить вибрации и поглотить энергию при динамических нагрузках. Это особенно важно для таких конструкций, как автомобильные и железнодорожные мосты, подкрановые конструкции, нефтяные и газовые платформы, которые подвержены сейсмическим и другим динамическим воздействиям. Исследования влияния динамических нагрузок на сталебетонные конструкции могут привести к разработке новых методов расчета и проектирования таких конструкций, что, в свою очередь, будет способствовать развитию инженерных решений с улучшенной эффективностью и безопасностью.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тихонов И.Н. Исследование прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов при кратковременных динамических нагрузках : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1974. 19 с.
2. Тихонов И.Н. Поведение железобетонных элементов при центральной сжатии однократной динамической нагрузкой до разрушения // Железобетонные конструкции : межвузовский сборник научных статей. Куйбышев, 1975. С. 144–152.
3. Копаница Д.Г., Моисеенко Р.П., Пляскин А.С. Собственные колебания сжатой сталебетонной колонны // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. Т. 371. № 5. С. 259–261.
4. Копаница Д.Г., Капарулин С.Л., Пляскин А.С., Устинов А.М., Каличкина А.С. Взаимосвязь напряженного состояния сжатой колонны и частоты собственных колебаний // Инвестиции, строительство и недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики : материалы Пятой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. В 2 частях. 2015. С. 294–300.
5. Копаница Д.Г., Белов Н.Н., Югов Н.Т., Ласковенко А.Г., Ласковенко Г.А., Пляскин А.С., Усманов А.У. Исследование прочности бетонных, фибробетонных и железобетонных плит на высокоскоростной удар модельным снарядом // Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия : сборник докладов Международной научно-практической конференции. Москва : НИУ МГСУ, 2016. С. 186–192.
6. Пляскин А.С., Устинов А.М., Кошко Б.О. Экспериментальные исследования зависимости частоты собственных колебаний железобетонной колонны от величины сжимающей силы // Инвестиции, строительство, недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики : материалы VIII Международной научно-практической конференции. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2018. Ч. 1. С. 416–420.
7. Пузанков Ю.И. Прочность и деформативность сжатых железобетонных элементов при поперечной динамической нагрузке : специальность 05.23.01 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1979. 22 с.
8. Eibl J. Behavior of critical regions under hard impact // Concrete structures under impact and impulsive loading. Berlin (West), 1982. V. 1. P. 113–127.
9. Louw M.J., Maritz G., Loedolff M.J. The Behaviour of RC Columns under Impact Loading // The Civil Engineer in South Africa. 1992. P. 371–378.
10. Jun W., Yu C., Kai W. Residual strength of CHS short steel columns after lateral impact // Thin-walled structures. 2017. № 118. P. 23–36. DOI: 10.1016/j.tws.2017.04.027

11. Каличкина А.С. Зависимость частоты собственных колебаний трубобетонной колонны от величины сжимающей силы // Инвестиции, строительство, недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики : материалы VII Международной научно-практической конференции. Томск : Изд-во ТГАСУ. 2017. Ч. 1. С. 350–352.
12. Хазов П.А., Помазов А.П. Прочность и продольный изгиб трубобетонных стержней при центральном сжатии // Строительная механика и конструкции. 2023. № 2 (37). С. 77–86.

## REFERENCES

1. Tihonov I.N. Strength Analysis of Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Elements under Dynamic Load. PhD Abstract. Moscow, 1974. 19 p. (In Russian)
2. Tihonov I.N. Behavior of Reinforced Concrete Elements under Axial Compression at Single Dynamic Load to Failure. *Zhelezobetonnye konstruksii*. 1975; 144–152. (In Russian)
3. Kopanica D.G., Moiseenko R.P., Plyaskin A.S. Natural Vibrations of Compressed Steel-Concrete Column. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*. 2017; 371 (5): 259–261. (In Russian)
4. Kopanica D.G., Kaparulin S.L., Plyaskin A.S., Ustinov A.M., Kalichkina A.S. Relationship Between Stress State of Compressed Column and Natural Vibration Frequency. In: *Proc. 5th All-Russ. Sci. Conf. 'Investments, Construction, Real Estate as a Material Basis for Economy Modernization and Innovation'*, in 2 vol. 2015. Pp. 294–300. (In Russian)
5. Kopanica D.G., Belov N.N., Yugov N.T., Laskovenko A.G., Laskovenko G.A., Plyaskin A.S., Usmanov A.U. Strength Analysis of Concrete, Fiber-Concrete and Reinforced Concrete Slabs at High-Velocity Impact of Model Projectile. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Modern Problems of Accidental Exposure Calculation for Reinforced Concrete Structures and Buildings'*. Moscow, 2016. Pp. 186–192. (In Russian)
6. Plyaskin A.S., Ustinov A.M., Koshko B.O. Natural Vibration Frequency of Reinforced Concrete Column Depending on Compressive Force. In: *Proc. 7th All-Russ. Sci. Conf. 'Investments, Construction, Real Estate as a Material Basis for Economy Modernization and Innovation'*, Vol. 1. Tomsk: TSUAB, 2018, Pp. 416–420. (In Russian)
7. Puzankov Yu.I. Strength and Deformability of Compressed Reinforced Concrete Elements under Transverse Dynamic Loading. PhD Abstract. Moscow, 1979. 22 p. (In Russian)
8. Eibl J. Behavior of Critical Regions under Hard Impact. *Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading*. Berlin (West), 1982; 1: 113–127.
9. Louw M.J., Maritz G., Loedolff M.J. The Behaviour of RC Columns under Impact Loading. *The Civil Engineer in South Africa*. 1992; 371–378.
10. Jun W., Yu C., Kai W. Residual Strength of CHS Short Steel Columns after Lateral Impact. *Thinwalled structures*. 2017; 118: 23–36. DOI: 10.1016/j.tws.2017.04.027
11. Kalichkina A.S. Dependence of Natural Vibration Frequency of Tubular Concrete Column on Compressive Force. In: *Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'Investments, Construction, Real Estate as a Material Basis for Economy Modernization and Innovation'*. Vol. 1. Tomsk: TSUAB, 2017. Pp. 350–352. (In Russian)
12. Khazov P.A., Pomazov A.P. Strength and Longitudinal Bending of Tubular Concrete Bars under Axial Compression. *Stroitel'naya mekhanika i konstruktzii*. 2023; 2 (73): 77–86. (In Russian)

## Сведения об авторах

Ерофеев Владимир Иванович, докт. физ.-мат. наук, профессор, директор, Институт проблем машиностроения РАН – филиал Института прикладной физики РАН, 603024, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, 85, erof.vi@yandex.ru

Хазов Павел Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, khazov.nngasu@mail.ru

Шкода Ирина Васильевна, аспирант, Институт проблем машиностроения РАН – филиал Института прикладной физики РАН, 603024, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, 85; ст. преподаватель, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, ShkodaIrinaVasil@yandex.ru

*Торопов Александр Сергеевич*, доцент, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, toropovdkzo@inbox.ru

**Authors Details**

*Vladimir I. Erofeev*, DSc, Professor, Director, Mechanical Engineering Research Institute RAS, Institute of Applied Physics RAS Affiliate, 85, Belinsky Str., 603024, Nizhny Novgorod, Russia, erof.vi@yandex.ru

*Pavel A. Khazov*, PhD, A/Professor, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Il'inskaya Str., 603000, Nizhny Novgorod, Russia, khazov.nngasu@mail.ru

*Irina V. Shkoda*, Research Assistant, Mechanical Engineering Research Institute RAS, Institute of Applied Physics RAS Affiliate, 85, Belinsky Str., 603024, Nizhny Novgorod, Russia; Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Il'inskaya Str., 603000, Nizhny Novgorod, Russia, ShkodaIrinaVasil@yandex.ru

*Aleksandr S. Toropov*, A/Professor, Nizhnii Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Il'inskaya Str., 603000, Nizhnii Novgorod, Russia, toropovdkzo@inbox.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 14.05.2024  
Одобрена после рецензирования 30.08.2024  
Принята к публикации 21.11.2024

Submitted for publication 14.05.2024  
Approved after review 30.08.2024  
Accepted for publication 21.11.2024

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 6. С. 214–223.

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 (6): 214–223.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.016

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-214-223

EDN: WIGGXU

## ФОРМУЛИРОВКА КРИТЕРИЯ МИНИМУМА ЭНЕРГИИ ДЕФОРМАЦИИ В ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧАХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СТЕРЖНЕЙ

**Андрей Викторович Мищенко**

*Новосибирский государственный*

*архитектурно-строительный университет (Сибстрин),*

*г. Новосибирск, Россия*

*Новосибирское высшее военное командное ордена Жукова училище,*

*г. Новосибирск, Россия*

**Аннотация.** *Актуальность.* Оптимизация строительных конструкций является одной из приоритетных инженерных задач. Ее актуальность обусловлена расширением многообразия типов внутренней структуры неоднородных конструктивных элементов, а также необходимостью построения уточненных математических моделей, учитывающих нелинейные факторы деформирования.

**Цель.** Получение конечных соотношений для интегрального критерия минимума энергии деформации применительно к структурно-неоднородному нелинейно деформируемому стержню. Расчетная схема стержня Тимошенко имеет симметричную структуру, содержит структурные элементы (слои), выполненные из однородных нелинейно-упругих материалов.

**Материалы и методы.** Для описания закона деформирования материалов используется полиномиальная аппроксимация произвольного порядка. На ее основе получены нелинейные зависимости для внутренних усилий – как функций обобщенных деформаций осевой линии. Коэффициентами в них выступают жесткостные характеристики высших порядков.

**Выводы.** Выведены удобные для практического применения конечные зависимости для компонент удельной энергии деформации в зависимости от деформации, кривизны и осредненного сдвига. Их применение позволяет упростить формулировку оптимизационных задач, решаемых на основе энергетического критерия, с учетом физической нелинейности и неоднородности стержней.

**Ключевые слова:** неоднородный стержень, слоистая структура, энергетический критерий, потенциальная энергия деформации, физическая нелинейность, жесткостные характеристики

**Для цитирования:** Мищенко А.В. Формулировка критерия минимума энергии деформации в физически нелинейных задачах деформирования неоднородных стержней // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 214–223. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-214-223. EDN: WIGGXU

ORIGINAL ARTICLE

**LEAST STRAIN ENERGY IN NONLINEAR PROBLEMS OF BAR NONUNIFORM DEFORMATION****Andrey V. Mishchenko***Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,  
Novosibirsk, Russia**Order of Zhukov Novosibirsk Higher Military Command School,  
Novosibirsk, Russia*

**Abstract.** Optimization of building structures is one of the priority engineering tasks. Its relevance is determined by the expansion of the variety of internal structures of nonuniform structural elements, as well as the need to construct refined mathematical models considering nonlinear deformation factors.

**Purpose:** The aim is to the integral criterion for the least strain energy in relation to a nonuniform, nonlinearly deformed bar. The design diagram of the Timoshenko bar has a symmetrical structure and contains structural elements (layers) made of homogeneous nonlinear elastic materials.

**Methodology:** The material deformation is described by a polynomial approximation of an arbitrary order. Nonlinear dependencies are obtained for internal forces as functions of generalized strain of the axial line. Their coefficients are rigidity characteristics of higher orders.

**Research findings:** The suggested dependences used for strain energy components, are derived depending on deformation, curvature and average shear. Their use makes it possible to simplify formulation of optimization problems solved using the energy criterion with regard to physical non-linearity and nonuniformity of bars.

**Keywords:** nonuniform bar, layered structure, energy criterion, potential strain energy, physical nonlinearity, rigidity properties

**For citation:** Mishchenko A.V. Least Strain Energy in Nonlinear Problems of Bar Nonuniform Deformation. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (6): 214–223. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-214-223. EDN: WIGGXY

**Введение**

Оптимизация строительных конструкций в настоящее время является одной из приоритетных инженерных задач. Ее актуальность существенно возрастает благодаря: а) росту интенсивности и усложнению характера внешних воздействий на здания и сооружения; б) расширению многообразия типов внутренней структуры конструктивных элементов, полученных в результате внедрения в практику новых принципов проектирования, среди которых одним из самых весомых является принцип структурной неоднородности; в) построению уточненных расчетных (математических) моделей конструктивных элементов, учитывающих нелинейные факторы деформирования.

Одним из главных этапов решения оптимизационных задач является выбор критерия оптимальности, позволяющего достоверно оценить качество полученного решения. Среди множества критериев, успешно применяющихся в данных задачах [1, 2], выделим энергетический критерий [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10], согласно которому наилучшие характеристики деформируемой системы обеспечивают минимум ее потенциальной энергии деформации. С одной стороны, требование о минимуме потенциальной энергии системы не имеет непо-

средственного практического смысла, заложенного, например, в нормы проектирования, но, с другой – оно базируется на фундаментальном понятии механики, из которого естественным образом вытекают многие известные методы расчета. Существенно также и то, что в самой формулировке энергетического критерия используются наиболее важные характеристики состояния конструкции – внутренние усилия и деформации.

В большинстве работ, известных в научной литературе, энергетический критерий оптимальности применяется для линейно деформируемых систем. Вместе с тем очевидно, что многие материалы, применяемые для изготовления несущих строительных конструкций, например бетоны, древесина, конструкционные пластмассы, некоторые композитные материалы, деформируются нелинейно. В связи с этим возникает практическая потребность в разработке: а) решений оптимизационных задач с учетом нелинейных факторов; б) приближенных расчетных математических подходов, обладающих приемлемой трудоемкостью для нелинейных задач.

Настоящая статья посвящена формулировке интегрального энергетического критерия оптимизации в форме конечных аналитических зависимостей для физически нелинейных задач на основе использования полиномиальных аппроксимаций напряжений для нелинейно-упругих материалов.

### Материалы и методы исследования

**1. Расчетная схема неоднородного стержня.** Для структурно-неоднородного конструктивного элемента плоской стержневой системы, расчетная схема которого характеризуется определенным набором  $P = [p_1, p_2, \dots]$  варьируемых параметров, запишем энергетический критерий в интегральной форме:

$$W(P) = \sum_i \iiint_V w_{\sigma_i} dx dy dz \rightarrow \min. \quad (1)$$

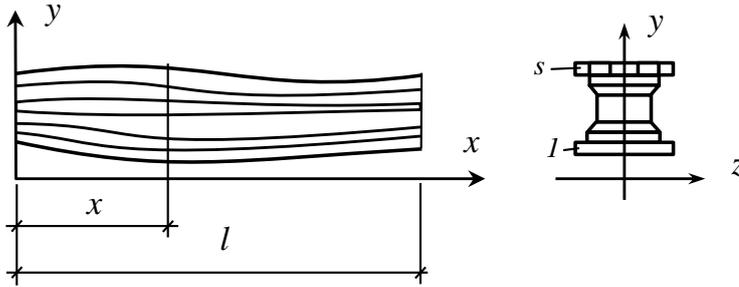
Выражение (1) содержит сумму интегралов от величин удельных энергий  $w_{\sigma_i}$  для каждой из учитываемых в принятой постановке компоненты напряжения  $\sigma_i$ . При деформировании плоских строительных конструкций, составленных из тонких стержней ( $h/l < 1/10$ ), будем использовать кинематические гипотезы Тимошенко при учете двух компонент тензора напряжений  $\sigma_i = [\sigma_x, \tau_{yx}]$ , в результате чего в формуле (1) будут присутствовать компоненты  $w_{\sigma_x}$ ,  $w_{\tau}$ . Как показывают расчеты [10], первая из них в стержневых системах с преимущественным изгибом дает наибольший вклад в энергию деформации.

Стержень, показанный на рисунке, составлен из  $s$  однородных структурных элементов (частей, слоев), соединенных между собой в монолитную неоднородную структуру. Способ соединения обеспечивает равенство перемещений на совместных участках границ структуры.

Свяжем со стержнем систему координат  $xuz$ , совместив ось  $x$  с геометрической осью стержня без привязки к физическому центру. При сохранении симметрии относительно вертикальной плоскости  $xu$  структурные элементы могут иметь разнообразную геометрическую форму и отражать типы структур [11]: поперечно-, радиально- и продольно-слоистую, армированную и др.  $k$ -й элемент ( $k = 1, \dots, s$ ) в стержне характеризуется набором геометрических функций

$$\mathbf{G}_k(x) = [g_{k1}(x), g_{k2}(x), \dots, g_{km}(x)], \quad (2)$$

необходимых для описания формы поперечного сечения данного элемента. В частности, они могут быть представлены шириной  $b_k(x)$  и высотой  $h_k(x)$  прямоугольного сечения слоя;  $\delta_k(x)$  – толщиной слоя концентрической слоистой структуры; диаметром  $d_k(x)$  и координатами центра сечения  $y_k(x)$   $k$ -го армирующего элемента и т. д.



Расчетная схема структурно-неоднородного стержня  
Design of bar with inhomogeneous structure

Будем считать, что материалы обладают нелинейно-упругими свойствами, описываемыми в рамках деформационной теории пластичности конечными зависимостями. Рассмотрим запись энергии деформации для компонент напряжений, учитываемых в (1).

**2. Энергия деформации нормальных напряжений.** Для нормального напряжения  $\sigma_x^{(k)}$ , действующего в  $k$ -м структурном элементе, примем модель [12], основанную на степенных функциях деформации с натуральными показателями

$$\sigma_x^{(k)}(\varepsilon) = p_{k,0}^{\sigma^\pm} + p_{k,1}^{\sigma^\pm} \varepsilon + p_{k,2}^{\sigma^\pm} \varepsilon^2 + \dots = \sum_{i=0}^r p_{k,i}^{\sigma^\pm} \varepsilon^i, \quad (3)$$

содержащую параметры  $p_{k,i}^{\sigma^+}$ ,  $p_{k,i}^{\sigma^-}$  (со знаками) для областей растяжения и сжатия. Путем подбора их значений обеспечивается требуемое соответствие модели (3) опытными данным. Как частные случаи из нее вытекают законы: а) жестко-пластического деформирования (активного без разгрузки)  $\sigma_x^{(k)}(\varepsilon) = p_{k,0}^{\sigma^\pm} = \sigma_{k,s}$  ( $\sigma_{k,s}$  – предел текучести  $k$ -го материала); б) линейно-упругого деформирования, в том числе разномодульного  $\sigma_x^{(k)}(\varepsilon) = p_{k,1}^{\sigma^\pm} \varepsilon$ ; в) квадратичного закона Ф. Герстнера  $\sigma_x^{(k)}(\varepsilon) = p_{k,1} \varepsilon + p_{k,2} \varepsilon^2$  (где  $p_{k,2} < 0$ ).

Аппроксимация (3) может содержать произвольный, необязательно последовательный, набор членов. В случае если закон деформирования материала может быть аппроксимирован нечетной функцией, то в (3) целесообразно удерживать члены с нечетными индексами  $i$ , благодаря чему отпадает необходимость специального выявления положения нейтральной поверхности.

Подстановка напряжения (3) в выражение удельной энергии деформации  $w_{\sigma_x}$  дает

$$w_{\sigma_x} = \int_0^{\varepsilon} \sum_{i=0}^r p_{k,i}^{\sigma_{\pm}} \varepsilon^i d\varepsilon = \sum_{i=0}^r \frac{p_{k,i}^{\sigma_{\pm}}}{i+1} \varepsilon^{i+1}. \quad (4)$$

Отсюда следуют формулы удельной (по объему) энергии для частных случаев использования в (3), (4) по одному слагаемому. Для первых четырех из них при  $i = 0, 1, 2, 3$ , учитывая (3), соответственно получим

$$\sigma_s \varepsilon, \quad \frac{1}{2} \sigma \varepsilon, \quad \frac{1}{3} \sigma \varepsilon, \quad \frac{1}{4} \sigma \varepsilon.$$

Далее, интегрируя по площади сечения удельную энергию (4), с учетом зависимости деформаций от кривизны  $\kappa$  и деформации  $\varepsilon_0$  отсчетной оси в форме

$$\varepsilon_x(x, y) = \varepsilon_0(x) - y \kappa(x), \quad (5)$$

получим выражение для погонной энергии деформации

$$W_{\sigma_x}(x) = \sum_{i=0}^r \sum_{j=0}^{i+1} \frac{c_{j+1}}{i+1} D_{ij} \varepsilon_0^{i+1-j} \kappa^j. \quad (6)$$

Здесь введены интегральные жесткостные характеристики  $D_{ij}(x)$  высших порядков для неоднородного сечения из нелинейно-упругих материалов:

$$D_{ij}(x) = \sum_{k=1}^s p_{k,i}^{\sigma_{\pm}} J_j^{(k)}, \quad J_j^{(k)}(x) = \iint_{A_k} y^j dA. \quad (7)$$

Индекс  $i$  соответствует номеру физического, а  $j$  – геометрического порядка. В частном случае при  $i = 1$  имеем три жесткостные характеристики линейной теории:

$$D_{10}(x) = \sum_{k=1}^s E_k A_k(x), \quad D_{11}(x) = \sum_{k=1}^s E_k S_k(x), \quad D_{12}(x) = \sum_{k=1}^s E_k I_k(x),$$

в которых  $A_k$ ,  $S_k$ ,  $I_k$  отражают площадь, статический момент и момент инерции сечения  $k$ -го элемента структуры.

Числовые коэффициенты  $c_{ij}$  ( $j = 0, \dots, i$ ) есть коэффициенты биномов Ньютона  $(a-b)^j$ . Первая сумма ( $i = 1, \dots, r$ ) в (6) содержит однородные блоки, число которых соответствует порядку степени в аппроксимации (3), а вторая ( $j = 0, \dots, i$ ) – слагаемые, зависящие от геометрических характеристик  $J_j^{(k)}(x) = \iint_{A_k} y^j dA$ , в количестве  $i+1$  в каждом из них.

Вычисляя жесткости  $D_{ij}^{(k)}$   $k$ -го элемента в (7), следует принимать

$$p_{k,i}^{\sigma} = \begin{cases} p_{k,i}^{\sigma+}, & \varepsilon(y) \geq 0 \in h_k; \\ p_{k,i}^{\sigma-}, & \varepsilon(y) < 0 \in h_k, \end{cases}$$

а при пересечении его нейтральной осью – выполнить дополнительную разбивку на подобласти с одинаковым знаком деформации.

В развернутом виде выражение (6) для первых трех порядков аппроксимации (3) принимает вид

$$W_{\sigma_x}(x) = \underbrace{D_{00}\varepsilon_0 - D_{01}\kappa}_{i=0} + \underbrace{\frac{1}{2}D_{10}\varepsilon_0^2 - D_{11}\varepsilon_0\kappa + \frac{1}{2}D_{12}\kappa^2}_{i=1} + \underbrace{\frac{1}{3}D_{20}\varepsilon_0^3 - D_{21}\varepsilon_0^2\kappa + D_{22}\varepsilon_0\kappa^2 - \frac{1}{3}D_{23}\kappa^3}_{i=2} + \dots \quad (8)$$

Зависимости (6), (8) для погонной энергии деформации могут быть получены и как работа интегральных усилий

$$[N, M](x) = \sum_{k=1}^s \iint_{A_k} [\sigma_x^{(k)}, -\sigma_x^{(k)} y] dA. \quad (9)$$

Подставив в (9) напряжения (3) с учетом закона (5), можем записать нелинейные физические соотношения:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^r \sum_{j=0}^i c_{ij} D_{ij} \varepsilon_0^{i-j} \kappa^j = N, \\ -\sum_{i=0}^r \sum_{j=0}^i c_{ij} D_{ij+1} \varepsilon_0^{i-j} \kappa^j = M. \end{cases} \quad (10)$$

Тогда погонная энергия деформации может быть найдена как

$$W_{\sigma_x}(x) = \sum_{i=0}^r \frac{1}{i+1} [N_i(x)\varepsilon_0(x) + M_i(x)\kappa(x)], \quad (11)$$

что в итоге дает совпадение с (6). Здесь  $N_i(x)$ ,  $M_i(x)$  – однородные блоки в (10) в суммах по переменной  $i$ .

**3. Энергия деформации сдвига.** Известно, в частности из работы [13], что использование в математической модели каких-либо априорных гипотез, в том числе Бернулли или Тимошенко, приводит к невозможности создания непротиворечивой расчетной теории стержней. В нашем случае это проявляется в наличии противоречия между закономерностью распределения касательных напряжений  $\tau_{yx}(y) \neq \text{const}$  (с учетом граничных условий) и принятой гипотезой  $\gamma_{yx}(y) = \gamma_0 = \text{const}$ . Поэтому удельная энергия деформации  $w_\tau$  не может быть найдена на основе подхода, использованного при получении удельной энергии (4). Минуя этап ее нахождения, определим погонную энергию деформации сдвига через интегральное усилие

$$W_Q(x) = \xi_\tau Q(x) \cdot \gamma_0(x), \quad (12)$$

где  $\xi_\tau$  – осредненное значение коэффициента полноты нелинейных диаграмм сдвига. Осреднение выполняется по материалам и по уровню деформаций в каждом из них.

Приближенно примем в качестве  $\xi_\tau$  аналогичный параметр закона нормальных напряжений для  $k$ -го материала

$$\xi_\sigma^{(k)}(\varepsilon) = \frac{1}{\varepsilon \sigma_k(\varepsilon)} \int_0^\varepsilon \sigma_k(\varepsilon) d\varepsilon.$$

При учете зависимости (3) получим

$$\xi_\sigma^{(k)}(\varepsilon) = \frac{\sum_{i=0}^r p_{k,i}^{\sigma^\pm} \frac{\varepsilon^{i+1}}{i+1}}{\sum_{i=0}^r p_{k,i}^{\sigma^\pm} \varepsilon^{i+1}}. \quad (13)$$

Для расчетной (осредненной) деформации  $\varepsilon = \varepsilon_*$  в (13) следует принять некоторое значение из допустимых интервалов  $\varepsilon_* = [0, \varepsilon_{\text{adm}}^{(k)}]$ . Окончательно, выполняя осреднение по площадям сечений структурных элементов, принимаем

$$\xi_\tau^{(k)} = \frac{\sum_k A_k \xi_\sigma^{(k)}(\varepsilon_*)}{\sum_k A_k}. \quad (14)$$

В частном случае линейного деформирования ( $r = 1, i = 1$ ), с удержанием в (3) одного слагаемого, коэффициенты (13), (14) имеют значения  $\xi_\sigma^{(k)}(\varepsilon) = \xi_\tau^{(k)} = 0,5$ . При произвольном значении порядка  $r$  для выпуклых функций (3) коэффициент (13) принимает значения  $0,5 \leq \xi_\sigma^{(k)} < 1$ .

Окончательно для двух учитываемых компонент напряжения энергия деформации будет определяться суммой (11) и (12) на основе выражения

$$W(x) = \kappa(x) \sum_{i=0}^r \frac{M_i(x)}{i+1} + \varepsilon_0(x) \sum_{i=0}^r \frac{N_i(x)}{i+1} + \xi_\tau Q(x) \cdot \gamma_0(x). \quad (15)$$

Первые два слагаемых могут быть тождественно заменены выражением (6).

Обобщенные деформации, входящие в (15), в физически нелинейных неоднородных системах имеют достаточно сложные зависимости (10) от усилий и варьируемых параметров, что практически исключает возможность выполнения аналитического решения задачи в целом.

При практической реализации процедур решения оптимизационных задач на основе нелинейного энергетического критерия (15), как правило, необходимо использовать численные поисковые процедуры. При этом в случае оптимизации функциональных геометрических размеров элементов структуры (слоев) стержней целесообразно выполнить переход к задаче конечномерной оптимизации, заменяя искомые геометрические функции  $g_{kj}(x)$  в (2) разложениями по заданным базисным функциям  $f_\lambda(x)$ :

$$g_j(x) \rightarrow g_0 \sum_{\lambda=1}^{\beta} p_{j,\lambda} f_\lambda(x)$$

с набором искомых параметров  $p_{j,\lambda}$ .

Критерий (1), (15) может включаться в многоэтапные алгоритмы оптимизации с наличием комплекса проектных ограничений либо быть самостоятельным и нести смысл целевой функции при добавлении ограничений, записанных в форме уравнений и неравенств:

$$g_j(P) \leq 0, \quad j = 1, \dots, n_g,$$
$$h_{n_g+j}(P) \leq 0, \quad j = 1, \dots, n_h.$$

После нахождения оптимальной конфигурации системы могут быть найдены амплитудные значения геометрических параметров исходя из удовлетворения нормативных критериев прочности, жесткости и др.

### Заключение

Полученные конечные зависимости для погонной энергии деформации позволяют сократить трудоемкость решения оптимизационных физически нелинейных задач для неоднородных стержневых систем.

Применение интегрального энергетического критерия дает возможность выполнять постановки задач широкого практического спектра, в их числе выявление рациональной конфигурации системы с точностью до принятых амплитудных значений параметров. В число варьируемых параметров конфигурации могут быть включены: различные геометрические параметры, например, отражающие отношения генеральных размеров системы, размеры поперечных сечений, характеристики опорных устройств (жесткости, эксцентриситеты); физические параметры, например, дискретные функции распределения характеристик материалов в неоднородных системах. С помощью данного подхода по единой схеме могут быть выполнены постановки задач с полным и частичным учетом видов деформации.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Тетерс Г.А.* Многоцелевое оптимальное проектирование композитных конструкций. Обзор // *Механика композитных материалов*. 1996. Т. 32. № 3. С. 363–376.
2. *Тамразян А.Г., Алексейцев А.В.* Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. Вып. 1. С. 12–30. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30
3. *Юрьев А.Г.* Естественный фактор оптимизации топологии конструкций // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2013. № 5. С. 46–48.
4. *Мондрус В.Л., Ступишин Л.Ю.* Реализация критерия критических уровней энергии в задачах строительной механики для систем с сосредоточенными параметрами // *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году : сборник научных трудов РААСН*. Москва : Российская академия архитектуры и строительных наук, 2022. С. 269–281.
5. *Ступишин Л.Ю.* Критические уровни внутренней потенциальной энергии деформации твердых деформируемых тел. Москва : Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2022. 387 с. DOI: 10.47581/2022/Stupushin.01
6. *Васильков Г.В.* Эволюционные задачи строительной механики. Синергетическая парадигма. Ростов-на-Дону : ИнфоСервис, 2003. 178 с.
7. *Зинькова В.А.* Оптимизация топологии металлических ферм // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2015. № 2. С. 37–40.

8. Кротких А.А., Максимов П.В. Нахождение глобального минимума энергии деформации в рамках разработки алгоритма топологической оптимизации // Математическое моделирование в естественных науках. 2017. Т. 1. С. 39–43.
9. Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Комплексный подход к топологической и параметрической оптимизации судовых конструкций // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. № 1 (391). С. 95–108.
10. Мищенко А.В. Оптимизация структурно-неоднородных стержневых конструкций на основе энергетического критерия // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 6 (750). С. 20–32. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-750-6-20-32
11. Мищенко А.В. Расчетная модель нелинейного динамического деформирования составных многофазных стержней // Вестник МГСУ. 2014. № 5. С. 35–43. EDN: SCJURD
12. Мищенко А.В. Способ формирования нелинейных физических соотношений в прямых и обратных задачах расчета многофазных стержней // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2014. Т. 14. № 3. С. 12–16. EDN: TAAFRD
13. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. Москва : Машиностроение, 1988. 272 с.

## REFERENCES

1. Teters G.A. Multi-Objective Optimal Design of Composite Structures. A Review. *Mekhanika kompozitnykh materialov*. 1996; 32 (3): 363–376. (In Russian)
2. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Modern Methods for Optimizing Structural Solutions for Load-Bearing Systems of Buildings. *Vestnik MGSU*. 2020; 15 (1): 12–30. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30 (In Russian)
3. Yuryev A.G. Natural Factor for Optimizing Structure Topology. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2013 (5): 46–48. (In Russian)
4. Mondrus V.L., Stupishin L.Yu. Implementation of Criterion of Critical Energy Levels in Problems of Structural Mechanics for Systems with Lumped Parameters. In: *Coll. Papers RAACS "Fundamental, exploratory and applied research of the RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2021"*. Moscow, 2022. Pp. 269–281. (In Russian)
5. Stupishin L.Yu. Critical Levels of Internal Potential Energy of Deformation of Solid Deformable Bodies. Moscow, 2022. 387 p. DOI: 10.47581/2022/Stupushin.01 (In Russian)
6. Vasilkov G.V. Evolutionary Problems of Structural Mechanics. Synergetic Paradigm. – Rostov-on-Don: InfoService, 2003. 178 p. (In Russian)
7. Zinkova V.A. Optimization of Metal Truss Topology. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2015; (2): 37–40. (In Russian)
8. Krotkikh A.A., Maksimov P.V. Global Minimum of Strain Energy in Developing Topological Optimization Algorithm. *Matematicheskoe modelirovanie v estestvennykh naukakh*. 2017; 1: 39–43. (In Russian)
9. Kryzhevich G.B., Filatov A.R. Integrated Approach to Topological and Parametric Optimization of Ships. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*. 2020; 1 (391): 95–108. (In Russian)
10. Mishchenko A.V. Optimization of Structurally Inhomogeneous Rod Structures Based on Energy. *Criterion Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2021; 6 (750). 20–32. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-750-6-20-32 (In Russian)
11. Mishchenko A.V. Calculation Model of Nonlinear Dynamic Deformation of Composite Multiphase Rods. *Vestnik MGSU*. 2014; (5): 35–44. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.5. 2014 (In Russian)
12. Mishchenko A.V. Formation of Nonlinear Physical Relationships in Direct and Inverse Analysis of Multiphase Rods. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2014; 14 (3): 12–16. EDN: TAAFRD (In Russian)
13. Vasiliev V.V. Structural Mechanics of Composite Materials. Moscow: Mashinostroenie, 1988. 272 p. (In Russian)

**Сведения об авторе**

*Мищенко Андрей Викторович*, докт. техн. наук, доцент, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113; Новосибирское высшее военное командное ордена Жукова училище, 630117, г. Новосибирск, ул. Иванова, 49, mishchenko.av59@yandex.ru

**Author details**

*Andrey V. Mishchenko*, DSc, A/Professor. Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, Order of Zhukov Novosibirsk Higher Military Command School, 49, Ivanov Str., 630117, Novosibirsk, Russia, mishchenko.av59@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 02.11.2024  
Одобрена после рецензирования 20.11.2024  
Принята к публикации 21.11.2024

Submitted for publication 02.11.2024  
Approved after review 20.11.2024  
Accepted for publication 21.11.2024