

Томский государственный  
архитектурно-строительный университет

# ВЕСТНИК

ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

TOM 22

№ 4 2020  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с апреля 1999 г.

This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue or grey ruling lines, typical of notebook paper. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ляхович Л.С., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, зав. кафедрой строительной механики ТГАСУ; [lls@tsuab.ru](mailto:lls@tsuab.ru); г. Томск  
Акимов П.А., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, главный ученый секретарь РААСН; [pavel.akimov@gmail.com](mailto:pavel.akimov@gmail.com), г. Москва  
Белостоцкий А.М., докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, ген. директор научно-исследовательского центра СтаДиО; [amb@stadyo.ru](mailto:amb@stadyo.ru), г. Москва  
Бондаренко И.А., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, директор НИИТИАГ, филиал ЦНИИП Минстроя России; [niitag@yandex.ru](mailto:niitag@yandex.ru); г. Москва  
Власов В.А., докт. физ.-мат. наук, профессор, ректор ТГАСУ; [rector@tsuab.ru](mailto:rector@tsuab.ru); г. Томск  
Волокитин Г.Г., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой прикладной механики и материаловедения ТГАСУ; [vvg-tomsk@mail.ru](mailto:vvg-tomsk@mail.ru); г. Томск  
Гныря А.И., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, зав. кафедрой технологии строительного производства ТГАСУ; [tsp\\_tgasu@mail.ru](mailto:tsp_tgasu@mail.ru); г. Томск  
Дегтярев В.В., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой гидротехнического строительства, безопасности и экологии НГАСУ (Сибстрин); [ngasu\\_gts@mail.ru](mailto:ngasu_gts@mail.ru), г. Новосибирск  
Дзюбо В.В., докт. техн. наук, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения ТГАСУ; [dzv1956@mail.ru](mailto:dzv1956@mail.ru), г. Томск  
Ефименко В.Н., докт. техн. наук, зав. кафедрой автомобильных дорог ТГАСУ; [svefimenko\\_80@mail.ru](mailto:svefimenko_80@mail.ru); г. Томск  
Ефименко С.В., докт. техн. наук, декан дорожно-строительного факультета ТГАСУ; [svefimenko\\_80@mail.ru](mailto:svefimenko_80@mail.ru), г. Томск  
Есаулов Г.В., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, проректор по научной работе МАРХИ; [gvesaulov@raasn.ru](mailto:gvesaulov@raasn.ru); г. Москва  
Жерардо М.Ч., докт. наук, профессор инженерного факультета Международного дистанционного университета UNINETTUNO; [g.cennamo@uninettunouniversity.net](mailto:g.cennamo@uninettunouniversity.net), г. Рим, Италия  
Ильичев В.А., докт. техн. наук, профессор, вице-президент РААСН, академик РААСН; [ilyichev@raasn.ru](mailto:ilyichev@raasn.ru); г. Москва  
Иняхотов И.С., докт. техн. наук, профессор, директор инженерно-строительного института СФУ; [iinzhotov@sfu-kras.ru](mailto:iinzhotov@sfu-kras.ru), г. Красноярск  
Князя Б.М., докт. техн. наук, профессор факультета проектирования зданий, сооружений и геотехники Политехнического университета Турина; [bernardino.chiaia@polito.it](mailto:bernardino.chiaia@polito.it), г. Турин, Италия  
Ковлер К.Л., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой строительных материалов и технологий Технион – Израильский технологический институт; [cvrkost@technion.ac.il](mailto:cvrkost@technion.ac.il); г. Хайфа, Израиль  
Копаница Н.О., докт. техн. наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ; [kopanitsa@mail.ru](mailto:kopanitsa@mail.ru); г. Томск  
Кудяков А.И., докт. техн. наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, советник РААСН; [kudyakov@tsuab.ru](mailto:kudyakov@tsuab.ru); г. Томск  
Кумпяк О.Г., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой железобетонных конструкций ТГАСУ, советник РААСН; [kumpyak@yandex.ru](mailto:kumpyak@yandex.ru); г. Томск  
Лежава И.Г., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, вице-президент РААСН, профессор МАРХИ; [lezhavailia@gmail.com](mailto:lezhavailia@gmail.com), г. Москва  
Морозов В.И., докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, зав. кафедрой строительных конструкций СПбГАСУ; [morozov@spbgasu.ru](mailto:morozov@spbgasu.ru), г. Санкт-Петербург  
Овсянников С.Н., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой архитектуры гражданских и промышленных зданий ТГАСУ; [ovssn@tsuab.ru](mailto:ovssn@tsuab.ru); г. Томск  
Плачиди Л.Л., докт. наук, доцент инженерного факультета Международного дистанционного университета UNINETTUNO; [luca.placidi@uninettunouniversity.net](mailto:luca.placidi@uninettunouniversity.net), г. Рим, Италия  
Поляков Е.Н., докт. искусствоведения, канд. архитектуры, профессор кафедры теории и истории архитектуры ТГАСУ, член Союза архитекторов России; [polyakov-en@ya.ru](mailto:polyakov-en@ya.ru); г. Томск  
Пустоветов Г.И., докт. архитектуры, профессор, чл.-корр. РААСН, советник ректората НГУАДИ; [pustovetovgi@gmail.com](mailto:pustovetovgi@gmail.com), г. Новосибирск  
Сколубович Ю.Л., докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, ректор НГАСУ (Сибстрин); [sjl1964@mail.ru](mailto:sjl1964@mail.ru), г. Новосибирск  
Травуш В.И., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, вице-президент РААСН; [travush@mail.ru](mailto:travush@mail.ru), г. Москва  
Цветков Н.А., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой теплогазоснабжения ТГАСУ; [nac@tsuab.ru](mailto:nac@tsuab.ru); г. Томск  
Чернышов Е.М., докт. техн. наук, профессор, председатель президиума Центрального отделения РААСН, академик РААСН; [chet@vgasu.vrn.ru](mailto:chet@vgasu.vrn.ru); г. Воронеж  
Шубин И.Л., докт. техн. наук, чл.-корр. РААСН, директор НИИСФ РААСН; [niisf@niisf.ru](mailto:niisf@niisf.ru), г. Москва  
Яненко А.П., докт. техн. наук, профессор кафедры гидротехнического строительства, безопасности и экологии НГАСУ (Сибстрин); [ngasu\\_gts@mail.ru](mailto:ngasu_gts@mail.ru), г. Новосибирск

## 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/>; «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 № 4 – 2020

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

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств коммуникаций ПИ №77-9483 от 30 июля 2001 г.

Редакторы Т.С. Володина, Г.Г. Семухина.  
Переводчик М.В. Воробьева. Дизайн Е.И. Кардаш.  
Технический редактор Н.В. Удлер.  
Подписано в печать 25.08.2020. Формат 70×108/16. Гарнитура Таймс.  
Уч.-изд. л. 14,74. Усл. печ. л. 17,5. Тираж 200 экз.  
Зак. № 78.

Адрес редакции: 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, 2020

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

VESTNIK  
TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO  
ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA

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

Volume 22

№ 4 2020  
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since April 1999

This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue or grey ruling lines, typical of notebook paper. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

## EDITORIAL STAFF

1. Lyakhovich L.S., DSc, Professor, RAACS Academician, Chief Editor, Head of Structural Mechanics Dept., TSUAB; [lls@tsuab.ru](mailto:lls@tsuab.ru), Tomsk, Russia
2. Akimov P.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Chief Academic Secretary; [pavel.akimov@gmail.com](mailto:pavel.akimov@gmail.com), Moscow, Russia
3. Belostotskii A.M., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Director General Research Center StaDiO; [amb@stadyo.ru](mailto:amb@stadyo.ru), Moscow, Russia
4. 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; [niitag@yandex.ru](mailto:niitag@yandex.ru), Moscow, Russia
5. Chernyshov E.M., DSc, Professor, RAACS Academician, Chairman of the Presidium of RAACS Central Regional Branch; [chem@vgasu.vrn.ru](mailto:chem@vgasu.vrn.ru), Voronezh, Russia
6. Chiaia B., PhD, Professor, Politecnico di Torino (Polytechnic University of Turin); [bernardino.chiaia@polito.it](mailto:bernardino.chiaia@polito.it), Turin, Italy
7. Degtyarev V.V., DSc, Professor, Head of Hydraulic Engineering, Safety and Ecology Dept., Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering; [ngasu\\_gts@mail.ru](mailto:ngasu_gts@mail.ru), Novosibirsk, Russia
8. Dzyubo V.V., DSc, Professor, Department of Water Supply and Sewage Systems, TSUAB; [dzv1956@mail.ru](mailto:dzv1956@mail.ru), Tomsk, Russia
9. Efimenko V. N., DSc, Professor, Dean of Road Engineering and Construction Faculty, Head of Automobile Roads Dept., TSUAB; [svefimenko\\_80@mail.ru](mailto:svefimenko_80@mail.ru), Tomsk, Russia
10. Efimenko S.V., DSc, Dean of Road Engineering and Construction Faculty, TSUAB; [svefimenko\\_80@mail.ru](mailto:svefimenko_80@mail.ru), Tomsk, Russia
11. Esaulov G.V., DSc, Professor, RAACS Academician, Vice-Rector for Research of Moscow Architectural Institute (State Academy); [esaulovgv@raasn.ru](mailto:esaulovgv@raasn.ru), Moscow, Russia
12. Girardot M.C., DSc, Professor, Engineering Dept., International Telematic University UNINETTUNO; [g.cennamo@uninettunouniversity.net](mailto:g.cennamo@uninettunouniversity.net), Roma, Italy
13. Gnyrya A.I., DSc, Professor, RAACS Adviser, Head of Construction Engineering Technology Dept., TSUAB; [tsp\\_tgasu@mail.ru](mailto:tsp_tgasu@mail.ru), Tomsk, Russia
14. Il'ichev V.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Vice President; [ilyichev@raasn.ru](mailto:ilyichev@raasn.ru), Moscow, Russia
15. Inzhutov I.S., DSc, Professor, Director School of Engineering and Construction, SibFU; [iinzhutov@sfu-kras.ru](mailto:iinzhutov@sfu-kras.ru), Krasnoyarsk, Russia
16. Kopanitsa N.O., DSc, Professor, Building Materials and Technologies Dept., TSUAB; [kopanitsa@mail.ru](mailto:kopanitsa@mail.ru), Tomsk, Russia
17. Kovler K., A/Professor, Civil and Environmental Engineering, Head of Building Materials, Performance & Technology Dept., Technion Israel Institute of Technology; [cvrkost@technion.ac.il](mailto:cvrkost@technion.ac.il), Haifa, Israel
18. Kudiyakov A.I., DSc, Professor; RAACS Adviser, Head of Construction Engineering Technology Dept., TSUAB (Tomsk, Russia); [kudiyakov@tsuab.ru](mailto:kudiyakov@tsuab.ru)
19. Kumpyak O.G., DSc, Professor; RAACS Adviser, Head of Reinforced Concrete and Masonry Structures Dept., TSUAB; [kumpyak@yan-dex.ru](mailto:kumpyak@yan-dex.ru), Tomsk, Russia
20. Lezhava I.G., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Vice President, Moscow Architectural Institute (State Academy); [lezhavailia@gmail.com](mailto:lezhavailia@gmail.com), Moscow, Russia
21. Morozov V.I., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Head of Engineering Constructions Dept., SPSUACE; [morozov@spbgasu.ru](mailto:morozov@spbgasu.ru), St-Petersburg, Russia
22. Ovsyannikov S.N., DSc, Professor, Head of Architecture of Civil and Industrial Buildings Dept., TSUAB; [ovssn@tsuab.ru](mailto:ovssn@tsuab.ru), Tomsk, Russia
23. Placidi L.L., DSc, A/Professor, Engineering Dept., International Telematic University UNINETTUNO; [luca.placidi@uninettunouniversity.net](mailto:luca.placidi@uninettunouniversity.net), Roma, Italy
24. Polyakov E.N., DSc, Professor; Member of the Union of Architects of Russia; Theory and History of Architecture Dept., TSUAB; [polyakov-en@ya.ru](mailto:polyakov-en@ya.ru), Tomsk, Russia
25. Pustovetov G.I., DSc, Professor, RAACS Correspondent Member, Adviser Novosibirsk State University of Architecture, Design and Fine Arts; [pustovetovgi@gmail.com](mailto:pustovetovgi@gmail.com), Novosibirsk, Russia
26. Skolubovich Yu.L., DSc, Professor, RAACS Correspondent Member, Rector Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering; [sjl1964@mail.ru](mailto:sjl1964@mail.ru), Novosibirsk, Russia
27. Shubin I.L., DSc, RAACS Corresponding Member, Director Structural Physics Research Institute, RAACS; [niisf@niisf.ru](mailto:niisf@niisf.ru), Moscow, Russia
28. Tsvetkov N.A., DSc, Professor, Head of Heat and Gas Supply Dept., TSUAB; [nac@tsuab.ru](mailto:nac@tsuab.ru), Tomsk, Russia
29. Travush V.I., DSc, Professor, RAACS Vice President, RAACS Academician; [travush@mail.ru](mailto:travush@mail.ru), Moscow, Russia
30. Vlasov V.A., DSc, Professor, Rector, TSUAB; [rector@tsuab.ru](mailto:rector@tsuab.ru), Tomsk, Russia
31. Volokitin G.G., DSc, Professor, Head of Applied Mechanics and Materials Science Dept., TSUAB; [vgg-tomsk@mail.ru](mailto:vgg-tomsk@mail.ru), Tomsk, Russia
32. Yanenko A.P., DSc, Professor, Hydraulic Engineering, Safety and Ecology Dept., Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering; [ngasu\\_gts@mail.ru](mailto:ngasu_gts@mail.ru), Novosibirsk, Russia

## 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.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 № 4 – 2020  
Print ISSN 1607-1859 Online ISSN 2310-0044

The journal is registered by the Federal Agency on Press and Mass Communications of the Russian Federation PI N77-9483, 30 July, 2001.

---

Editors T.S. Volodina, G.G. Semukhina  
Translator M.V. Vorob'eva. Design: E.I. Kardash  
Technical editor N.V. Udler  
Passed for printing: 25.08.2020. Paper size: 70×108/16. Typeface: Times New Roman  
Published sheets: 14,74. Conventional printed sheets: 17,5. Print run: 200 copies  
Order N 78.

---

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, 2020

## С О Д Е Р Ж А Н И Е

### АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

|                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Незвицкая Т.В.</b> К вопросу об эволюции подходов к сохранению памятников деревянного зодчества (СПбГАСУ, Государственный историко-архитектурный и этнографический музей-заповедник «Киж», г. Санкт-Петербург)..... | 9  |
| <b>Жарикова М.В.</b> Архитектурный комплекс «Усадьба Баландина» в г. Енисейске: архитектурный, археологический, дендрохронологический аспекты (СФУ, г. Красноярск) .....                                               | 23 |
| <b>Литвинов С.В., Титова М.М.</b> Анализ методологических подходов к изучению мегаполиса (НГАСУ, г. Новосибирск) .....                                                                                                 | 37 |
| <b>Колосова И.И., Вадяева Д.А.</b> Этапы развития, становления и совершенствования конструктивных особенностей дерева в архитектуре стран Древнего мира до н. э. (ТГАСУ, г. Томск).....                                | 48 |
| <b>Залесова П.В., Манонина Т.Н., Васина Н.В.</b> «Стиль драконов» в архитектуре России начала XX в. (ТГАСУ, г. Томск).....                                                                                             | 73 |

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Перельмутер А.В.</b> Обратные задачи строительной механики (НПО SCAD Soft, Украина, г. Киев) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 83  |
| <b>Яхьяев Д.Д.</b> Исследование упругой клепаной перфорированной панели с трещинами (АзТУ, Азербайджан, г. Баку) .....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 102 |
| <b>Ляхович Л.С., Акимов П.А., Тухфатуллин Б.А.</b> Оценка близости к проекту минимальной материалоемкости решения об оптимизации ширины кусочно-постоянных участков полки стержней двутаврового поперечного сечения при ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний с учётом требований прочности (ТГАСУ, г. Томск, НИ МГСУ, РААСН, г. Москва) ..... | 114 |
| <b>Яхьяев Д.Д.</b> Исследование клепаной перфорированной упругой панели с включениями из инородного материала (АзТУ, Азербайджан, г. Баку).....                                                                                                                                                                                                                                            | 126 |

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

|                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Власов В.А., Шеховцов В.В., Волокитин О.Г., Скрипникова Н.К., Волокитин Г.Г., Гафаров Р.Е.</b> Особенности формирования структурно-фазового состава микросфер на основе материалов алюмосиликатной группы (ТГАСУ, г. Томск) ..... | 140 |
| <b>Демьяненко О.В., Копаница Н.О., Саркисов Ю.С., Горленко Н.П.</b> Исследование свойств цементного камня с комплексной добавкой (ТГАСУ, г. Томск).....                                                                              | 147 |

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ,  
СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

|                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Иваненко И.И., Лапатина Е.Я.</b> Использование сульфата как терминального акцептора электронов при окислении толуола в анаэробных условиях (СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург)..... | 157 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

|                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Григорьева Ю.В., Игнатова Ю.И., Чугунов А.Г., Климентьев Д.С., Королёва А.П.</b> Разработка и практическое применение программного модуля для расчета нормативных глубин промерзания (оттаивания) (АО «ТомскНИПИнефть», г. Томск)..... | 168 |
| <b>Самарин Д.Г., Устюжанин В.Л., Лобанов А.А.</b> Исследования по определению длины буронабивных свай акустическими методами, основанными на схеме двух каналов измерения (ТГАСУ, г. Томск).....                                          | 180 |

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

|                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Моисеенко Р.П., Пушкарёва Г.В., Куция И.З.</b> Надёжность нежестких дорожных одежд по морозоустойчивости (ТГАСУ, г. Томск)..... | 192 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## C O N T E N T S

### ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

|                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Nezvitskaya T.V.</b> Evolution of approaches to wooden architecture preservation (Saint-Petersburg).....                                                   | 9  |
| <b>Zharikova M.V.</b> Architectural complex "Balandin's Manor" in Yeniseysk: architectural, archeological and dendrochronological aspects (Krasnoyarsk) ..... | 23 |
| <b>Litvinov S.V., Titova M.M.</b> Analysis of methodological approaches to metropolis study (Novosibirsk).....                                                | 37 |
| <b>Kolosova I.I., Vadyaeva D.A.</b> Development, formation and improvement of wood constructional properties in ancient architecture BC (Tomsk).....          | 48 |
| <b>Zalesova P.V., Manonina T.N., Vasina N.V.</b> Dragestil in Russian architecture early in the 20th century (Tomsk) .....                                    | 73 |

### BUILDING AND CONSTRUCTION

|                                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Perelmuter A.V.</b> Inverse problems of structural mechanics (Kiev, Ukraine).....                                                                                                                                                                                             | 83  |
| <b>Yakhyaev J.D.</b> Elastic riveted perforated plate with cracks (Baku, Azerbaijan) .....                                                                                                                                                                                       | 102 |
| <b>Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A.</b> Estimated closeness of optimum piecewise constant section width in i-rods with stability or first eigen-frequency limits to the predicted minimum material consumption with regard to strength requirements (Moscow)..... | 114 |
| <b>Yakhyaev J.D.</b> Elastic riveted perforated plate with foreign inclusions (Baku, Azerbaijan).....                                                                                                                                                                            | 126 |

### CONSTRUCTION TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

|                                                                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Vlasov V.A., Shekhovtsov V.V., Volokitin O.G., Skripnikova N.K., Volokitin G.G., Gafarov R.E.</b> Structure and phase composition of aluminosilicate-based microspheres (Tomsk)..... | 140 |
| <b>Dem'yanenko O.V., Kopanitsa N.O., Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P.</b> Properties of hydrated cement with complex additive (Tomsk) .....                                                | 147 |

WATER SUPPLY, SEWERAGE, BUILDING SYSTEMS  
OF WATER RESOURCE PROTECTION

|                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Ivanenko I.I., Lapatina E.Y.</b> Sulfate as a terminal electron acceptor in toluene oxidation<br>in anaerobic conditions (Saint-Petersburg) ..... | 157 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

|                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Grigoreva Yu.V., Ignatova Yu.I., Chugunov A.G., Klimentev D.S., Korolyova A.P.</b><br>Software development and implementation for calculation of freezing/thawing standard depth<br>(Tomsk)..... | 168 |
| <b>Samarin D.G., Ustyuzhanin V.L., Lobanov A.A.</b> Acoustic measurements of bored pile<br>length using two channels (Tomsk) .....                                                                  | 180 |

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

|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Moiseenko R.P., Pushkaryova G.V., Kucyia I.Z.</b> Frost resistance of flexible pavements<br>(Tomsk)..... | 192 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|



# АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 72.025.4

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-9-22

*Т.В. НЕЗВИЦКАЯ,  
Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет,  
Государственный историко-архитектурный  
и этнографический музей-заповедник «Кижжи»*

## **К ВОПРОСУ ОБ ЭВОЛЮЦИИ ПОДХОДОВ К СОХРАНЕНИЮ ПАМЯТНИКОВ ДЕРЕВЯННОГО ЗОДЧЕСТВА**

В статье анализируется деятельность по сохранению памятников деревянного зодчества на примере деревянных храмов Заонежья. В XXI в. при многочисленных утратах деревянных храмов как никогда становится актуальной проблема поиска эффективного подхода к сохранению хрупкого деревянного наследия России.

Цель исследования – выявить подходы к сохранению памятников деревянного зодчества, сложившиеся в ходе их исторической эволюции, рассмотреть положительные и отрицательные стороны выявленных подходов в аспекте сохранения архитектурной ценности объектов в XIX–XXI вв.

В ходе исследования был изучен и обобщен теоретический и практический опыт сохранения в XIX–XXI вв. на примере деревянных храмов Заонежья. Выполнен сравнительный анализ подходов сохранения. Предложенный метод SWOT-анализа позволяет объективно оценить существующие положительные и отрицательные факторы региона для сохранения деревянного храма, возможности и угрозы для памятника.

Основные результаты исследования состоят в выявлении и классификации подходов к сохранению памятников деревянного зодчества на примере церкви Преображения Господня Кижского погоста и храмов Заонежья.

Предложенная классификация подходов позволяет объективно оценить необходимость их применения при сохранении памятников деревянного зодчества в каждой конкретной ситуации. В статье предлагается рассматривать такие региональные факторы, которые будут способствовать введению деревянных храмов в культурный оборот. Предложение может быть актуализировано на исторических деревянных постройках с учетом их индивидуальных особенностей.

**Ключевые слова:** памятники деревянного зодчества; деревянные храмы; подходы; реставрация; консервация; ремонт.

**Для цитирования:** Незвицкая Т.В. К вопросу об эволюции подходов к сохранению памятников деревянного зодчества // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 4. С. 9–22. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-9-22

T.V. NEZVITSKAYA,  
*Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,  
Kizhi State Historical, Architectural and Ethnographic Memorial Estate*

## EVOLUTION OF APPROACHES TO WOODEN ARCHITECTURE PRESERVATION

The article analyzes the conservation of wooden architecture on the example of wooden temples of Zaonezhie. In the 21st century, with numerous losses in wooden churches, the problem of finding an effective approach to preserving the fragile wooden heritage of Russia becomes more and more relevant.

The aim of this work is to identify approaches to preservation of wooden architecture, consider the positive and negative sides of the identified approaches in terms of preservation of the architectural heritage of the 19th, 20th, and 21st centuries.

Theoretical and practical experience of preservation of wooden architecture in these centuries is studied and summarized in relation to wooden temples of Zaonezhie. A comparative analysis of preservation approaches is carried out. The SWOT analysis provides an objective assessment of positive and negative factors of preserving the wooden church in the region, and opportunities and threats to this monument.

The paper identifies and classifies approaches to preservation of wooden monuments, the Church of Transfiguration of the Lord of Kizhi pogost and temples of Zaonezhie, in particular.

The proposed classification of approaches makes it possible to objectively assess the need for their use in preserving the wooden architecture in each specific situation. The paper considers the regional factors, which can contribute to the introduction of wooden temples in the cultural turnover. The research results can be updated on historical wooden buildings, taking into account their individual characteristics.

**Keywords:** wooden architecture; wooden temples; approaches; restoration; conservation; repair.

**For citation:** Nezvitskaya T.V. K voprosu ob evolyutsii podkhodov k sokhraneni-yu pamyatnikov derevyannogo zодчества [Evolution of approaches to wooden architecture preservation]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 4. Pp. 9–22.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-9-22

По сведениям разработчиков «Концепции сохранения памятников деревянного зодчества и включения их в культурный оборот до 2025 года» [1], до наших дней на Русском Севере сохранилась четверть существовавших в 1917 г. деревянных церквей XV–XVIII вв. Эта критическая ситуация по обеспечению сохранности культового деревянного зодчества сложилась по следующим причинам. Основной фактор – это приближение предельного возраста существования деревянных храмов, построенных более трёхсот лет назад. Ежегодные пожары, которые приводят к полной ликвидации объектов, стали еще одной причиной утрат знаменитых и уникальных деревянных церквей и «тройников» – две церкви и колокольня [2].

Подходы к сохранению деревянных храмов на протяжении последних двухсот лет менялись кардинально – от реконструкции к максимальному сохранению. Вмешательства в ценностные характеристики деревянных храмов происходили активно в XIX в., когда «множество самых интересных из них были или разрушены, или реставрированы в «новейшем» вкусе» и их невоз-

можно было отличить от каменных построек [3–9]. В XX в. сложилось негативное отношение ко всем выполненным работам XIX в. [10]. В основном это касалось работ по изменению архитектурно-пространственных решений деревянных храмов. Однако ремонт, укрепление и содержание в исправном состоянии продлевали их срок существования. Подход сохранения XIX в. был скорее *утилитарный*, который сформировался под воздействием социально-экономических, политических, архитектурных влияний. Основные критерии этого подхода имели практический характер и соответствовали законодательству данного периода и архитектурным предпочтениям. Целью данного подхода стало обеспечение православного прихода летним и зимним храмом для проведения церковных служб (рис. 1).



Рис. 1. Кижский погост Петрозаводского уезда Олонецкой губернии. Преображенская церковь и колокольня. 1920 г. Вид с запада. Автор Ф.А. Каликин. Коллекция фотографий музея-заповедника «Кижи», Фонд НВФ-13298/4

XIX в. – время становления археологической науки. Именно тогда возник *археологический* подход к сохранению памятников древности, основанный на тщательном исследовании объекта как исторического источника [11, 12]. Этот подход можно еще охарактеризовать и как *научный* подход, когда информация, полученная при изучении памятника древности, систематизируется, а признаки классифицируются по тому или иному основанию.

Поэтому уже с XIX в. в России защита древностей стала одним из подходов к сохранению памятников – *законодательным или административным* [13]. В XIX в. строительная деятельность была взята под жесткий государ-

ственный контроль. Вышли документы, нормирующие строительные и ремонтные работы, среди них «Урочные положения на все вообще работы, производящиеся при крепостях, гражданских зданиях и гидротехнических сооружениях»<sup>1</sup>, на основании которых готовились сметы, в том числе и ремонты деревянных храмов<sup>2</sup>. В своде законов Российской империи указывалось, что «строжайше воспрещается разрушать остатки древних замков, крепостей, памятников и других зданий древностей»<sup>3</sup>. Защита на юридическом уровне позволяет добиться весомых результатов только при разработанном законодательстве о сохранении памятников истории и культуры, органе, ответственном за его исполнение, и контроле, действенном механизме работы, а также осознанном гражданском обществе.

К одному из подходов к сохранению традиционного деревянного храмостроительства можно отнести и условие в своде законов о «построении новых сельских церквей вместо обветшалых или сгоревших, чтобы старинные церкви, замечательные в каком-либо отношении историческом, возобновлялись с сохранением прежнего вида»<sup>4</sup>. На сохранение основных архитектурных форм старинных церквей в Заонежье в XIX в. также повлиял *подход возобновления*, продиктованный административным регламентом. И в наше время этот подход нашел живой отклик в Заонежье, который сегодня можно назвать *ревитализацией*.

Во второй половине XX в. проходили активные реставрационные процессы. В этот период реставрация деревянного зодчества выполнялась на основе методики, разработанной А.В. Ополовниковым. Целью его методики стало идейное содержание архитектурного образа и художественной формы, которое должно было соответствовать советской эпохе [14]. При этом «традиции и дух народного зодчества» рассматривался как основной критерий оптимального облика памятника [15]. Поэтому были демонтированы позднейшие наслоения, которые признаны чуждыми народному зодчеству. Подход к сохранению был направлен на эмоциональное восприятие храма и его изучение. Характер подхода – *художественно-реставрационный*. Данный идейно-художественный подход позволил сохранить оптимальный облик деревянных храмов, но не позволил зафиксировать более поздние наслоения, которые в то время были признаны не отвечающими народному зодчеству (рис. 2).

В последние десятилетия XX в. отношение к деревянным храмам изменилось, как и отношение к «позднейшим наслоениям». Так, например, решениями Карельской специальной научно-реставрационной производственной мастерской была сохранена обшивка и другие позднейшие наслоения при реставрации храмов в Заонежье: церковь Николая Чудотворца в д. Вегоруксе, часовня Георгия Победоносца в д. Кефтеницы, часовни Троицы Живоначаль-

<sup>1</sup> Урочные положения 1843 года на все вообще работы, производящиеся при крепостях, гражданских зданиях и гидротехнических сооружениях. Санкт-Петербург: Типография Святейшаго Правительствующаго Синода, 1843.

<sup>2</sup> Полное собрание законов Российской империи. Т. 12. Строительный устав. 1857. № 2096. С. 47, 48.

<sup>3</sup> Там же. № 181. С. 40.

<sup>4</sup> Там же. № 200. С. 48.

ной и Дмитрия Солунского в д. Селецкое, часовня Николая Чудотворца в д. Тамбицы. Основная цель этих реставраций заключалась в максимальном сохранении исторической материи памятника и его изучении.



Рис. 2. Чертёж реставрации. Преображенская церковь на о. Кижи. Южный фасад. Автор А.В. Ополовников, 1949 г. Каталог коллекции архитектурной графики музея-заповедника «Кижи», КП-267/47 Ч-144

В этот период основным критерием сохранения «позднейших наслоений» стала их высокая сохранность, в отличие от критерия сохранения А.В. Ополовникова середины XX в. Тем самым был сохранен облик деревянных храмов периода XIX в. Характер этого подхода – *консервационно-реставрационный*. Таким образом, с точки зрения сохранности историко-культурной ценности памятника максимальное сохранение деревянных храмов Заонежья было достигнуто при последних реставрациях XX в. (рис. 3).

В Европе еще в XIX в. поборники максимальной защиты Джон Рескин [16], Уильям Моррис, Анатоль Франс и Проспер Мериме придерживались позиции сохранения памятника и руин в неизменяемом виде. Защита памятников в их историко-культурной ценности путем консервации не могла не повлиять и на российскую научную общественность XIX–XX вв.

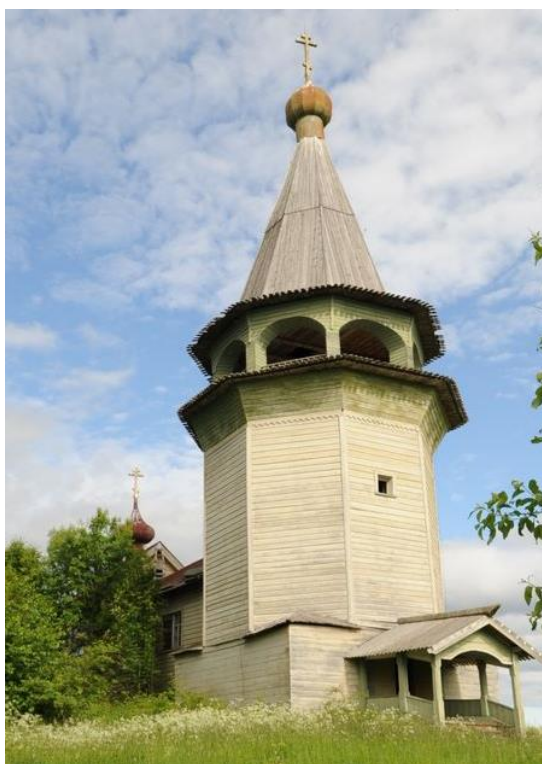


Рис. 3. Церковь Николая Чудотворца в д. Вегоруксе, 2007 г. Фото автора

В XIX в. Алоиз Ригль, австрийский историк, искусствовед, при обсуждении применения таких видов работ, как консервация и реставрация памятников, считал консервацию приоритетным направлением. Он полагал необходимым сохранять изменения, наслоения и защищать следы истории [17]. Археологический подход описан при изучении памятника в научных трудах венской школы А. Ригля и К. Гурлита, итальянского профессора К. Бойто и историка архитектуры Г. Джованони [18], а также сформулирован в работах П. Покрышкина, Н. Рериха, А. Щусева [19]. Петр Петрович Покрышкин в «Кратких советах по вопросам ремонта памятников старины и искусства» дал следующие рекомендации: «Общий принцип для реставрирования памятников – оставлять в неприкосновенности прочное и заменять ветхое в прежнем виде или в степени сохранности первоначального или интересного» [20].

О таком подходе сохранения уже в XX в. пишет Чезаре Бранди: «Реставратор также должен оставлять участки произведений в том состоянии, которое предшествовало его вмешательству. Максимальное сохранение объекта было определено им как «критический подход к реставрации», где результат работ определяется по ценности, заключенной в памятнике [21]. В связи со стабильностью визуального облика дошедших до нас деревянных культовых сооружений, *критический подход* к реставрации скорее будет использоваться в будущем, когда придет время формировать защитные конструкции для самых древних деревянных храмов.

Таким образом, основные подходы к сохранению памятников, в том числе и деревянного зодчества, возникли во второй половине XIX в. и получили свое развитие в XX в. – *утилитарный, законодательный, археологический (научный), возобновления (ревитализация), стилистический, художественный, консервационный*.

В начале XXI в. в соответствии с разработанными нормативными документами, а именно Федеральным законом Российской Федерации от 25.06.2002 г. № 73 «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации», статьи 40, были определены виды работ по сохранению: консервация, ремонт, реставрация, приспособление для современного использования. Однако в определении Федерального закона № 73, статьи 43, только реставрация проводится в целях сохранения историко-культурной ценности объекта. Все перечисленные виды работ выполняются с разной степенью вмешательства в памятник, но с одной целью – сохранение историко-культурной ценности. При этом процессы или приемы, которые используются плотниками-реставраторами с XX в., не меняются: раскрытие, дополнение, укрепление, добавление, замена или восстановление [22].

В Заонежье процесс восстановления утраченных храмов возобновился в начале XXI в.: были воссозданы храм Пророка Ильи в Телятниково, часовня Зосимы и Савватия Соловецких в д. Загубье, часовня Владимирской иконы Божьей Матери в д. Усть-Реке и построены новые часовни в деревнях Кажме, Палтеге, Потаневщине. Частная инициатива по деревянному храмостроительству и поддержка традиций и мастерства заонежских плотников также является одним из подходов к сохранению. Этот подход определен нами как *ревитализация, или возобновление* деревянного храмостроительства на исторических территориях [23]. Положительные стороны этого процесса можно рассматривать только при условии выполнения научного подхода, что позволяет сохранить исторические архитектурные формы и плотницкие традиции.

Правильный прогнозируемый подход продлевает срок существования деревянного сооружения до пятисот лет [24]. Важность сохранения не только объектов культурного наследия, но и важность понимания защиты нематериального наследия – знаний, навыков, связанных с традиционными ремёслами, установлены международным законодательством<sup>5</sup> и являются основой для понимания и уважения материального наследия. Передача этих знаний является отражением общего процесса формирования культуры и определяет качество жизни [25]. Поэтому более эффективным подходом к сохранению на современном этапе является *комплексный* подход. Он включает в себя позитивные качества каждого отдельного подхода.

Комплексный подход обеспечивает максимальное сохранение деревянных храмов. При этом подходе решаются вопросы стратегического управления объектом культурного наследия, а именно: включение в культурный и научный оборот, его противопожарная защита, автоматическое пожароту-

<sup>5</sup> Конвенция об охране нематериального культурного наследия. Принята 17 октября 2003 г. Генеральной конференцией Организации Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры. URL: [https://www.un.org/ru/documents/decl\\_conv/conventions/cultural\\_heritage\\_conv.shtml](https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/cultural_heritage_conv.shtml)

шение, текущее содержание, биологический и деформационный мониторинг, использование по прямому назначению, регламентные и профилактические работы, плановая консервация и ремонты, учет антропогенной нагрузки, восстановление и содержание исторического ландшафта, изучение и обучение плотницкому ремеслу. С помощью метода стратегического планирования – SWOT-анализа – можно определить внутренние и внешние факторы среды объекта культурного наследия. В каждой рассматриваемой ситуации анализируются сильные и слабые стороны памятника, а возможности и угрозы являются факторами внешними. Этим инструментом пользуются при разработке стратегического управления историческими объектами международные специалисты при создании экологических маршрутов с привлечением деревянных памятников [26, 27]. Такой подход был применен при реставрации церкви Преображения Господня Кижского погоста (рис. 4) [28].



Рис. 4. Церковь Преображения Господня Кижского погоста после реставрации, 2019 г.  
Фото автора

В результате проведенного исследования были определены подходы к сохранению деревянных храмов Заонежья (таблица).



**Классификация подходов сохранения  
по степени сохранения архитектурно-пространственного решения**

| Подход                         | Период             | Основной критерий, свойства                                                                                           | Степень сохранения архитектурно-пространственного решения                                                                        |
|--------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Утилитарный                    | Вторая пол. XIX в. | Практичность, функциональность                                                                                        | Низкая, средняя                                                                                                                  |
| Законодательный                | Вторая пол. XIX в. | Законодательные акты в области сохранения памятников, специализированный орган, механизм работы, гражданское общество | Высокая, при соблюдении всех условий использования подхода                                                                       |
| Научный (археологический)      | Вторая пол. XIX в. | Обследование, изучение, систематизация, классификация свойств объекта                                                 | Высокая                                                                                                                          |
| Возобновление / Ревитализация  | XIX в. XXI в.      | Строительство храма<br>Оживление территории                                                                           | Умеренная, при соблюдении всех условий (материала, традиций, архитектурно-пространственных форм, плотницкого мастерства)         |
| Художественно-реставрационный  | 50–80-е гг. XX в.  | Социальная и культурная значимость объекта, характеризующая народное зодчество, сохранение оптимального облика        | Средняя, высокая, при соблюдении всех условий (материала, традиций, архитектурно-пространственных форм, плотницкого мастерства)  |
| Консервационно-реставрационный | Конец XX в.        | Максимальное сохранение историко-культурной ценности объекта                                                          | Высокая                                                                                                                          |
| Комплексный                    | Начало XX в.       | Системный подход при решении разноплановых задач (приспособления, территории, экологии)                               | Высокая и средняя, при соблюдении всех условий (материала, традиций, архитектурно-пространственных форм, плотницкого мастерства) |
| Критически реставрационный     | Прогнозный         | Баланс эстетических и исторических характеристик памятника                                                            | Высокая                                                                                                                          |

Эффективность проведенных реставрационных работ во много раз возрастет, если обеспечить содержание памятника и включить его в культурный оборот района, региона как с точки зрения улучшения экономических показателей, так и социальных, политических, образовательных и многих других.

### Заключение

Основные результаты исследования состоят в выявлении и классификации подходов сохранения памятников деревянного зодчества, которые возникли во второй половине XIX в., сформировались к середине XX в. и получили свое развитие в XXI в. Выявлены положительные и отрицательные аспекты при осуществлении деятельности по сохранению деревянных храмов Заонежья.

Выявленные подходы эволюционировали в зависимости от социально-экономического развития, региональных условий со второй половины XIX в. К началу XXI в.

В связи с массовыми утратами деревянного храмового зодчества в XX в. и критическим возрастом большинства объектов в Заонежье необходимо сформировать новый подход к сохранению, который будет способствовать сохранению хрупкого деревянного наследия. Данная тема исследования представляет собой ценность при разработке программ, проектов, мероприятий по сохранению деревянных храмов и требует дальнейшего изучения. Классификация предлагает выбор оптимального подхода к сохранению с учетом региональных особенностей, характеристик памятника, вовлечения в культурный оборот и других аспектов. В результате анализа сложившихся подходов была определена степень влияния выбранного подхода к сохранению объекта архитектурно-пространственных характеристик от самой незначительной до высокой. В связи с возникшим интересом к храмостроительству в XXI в. в Заонежье необходимо научное и законодательное регулирование данных вопросов для сохранения архитектурного облика храмов Заонежья, традиционных технологий и плотницкого мастерства.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Концепции сохранения памятников деревянного зодчества и включения их в культурный оборот до 2025 года* / Министерство культуры Российской Федерации [официальный сайт]. URL: <https://www.mkrf.ru/documents/kontseptsiya-sokhraneniya-pamyatnikov-derevyannogo-zodchestva-i-vklyucheniya-ikh-v-kulturnyy-oborot/> (дата обращения: 10.03.2020).
2. *45 деревянных храмов, потерянных Россией в огне. 1985–2018*. URL: <http://hraniteli-nasledia.com/articles/dose/45-derevyannykh-khramov-poteryannykh-rossiey-v-ogne-1985-2018/> (дата обращения: 30.04.2020).
3. *Деревянные церкви* // Зодчий : художественно-технический журнал. 1872. № 1. С. 2–4.
4. *Ходаковский Е.В.* Ремонты и перестройки памятников средневекового деревянного зодчества Русского Севера в «дореставрационный период» (1800–1880-е гг. // *Seminarium Bulkinianum*. IV: К 80-летию со дня рождения Валентина Александровича Булкина. Санкт-Петербург : Каламос, 2017. С. 360.
5. *Гуцин Б.А., Гуцина В.А.* Из приходно-расходной книги Кижской церкви Петрозаводского уезда Олонецкой Епархии за 1822–1827 гг. о расходах на обивку глав Преображен-

- ской церкви // Документы и материалы по истории Кижского архитектурного ансамбля (1694–1945 гг.). Петрозаводск, 2013. С. 137.
6. *Гущин Б.А., Гущина В.А.* Из книги счетов Кижского церковного старосты Петра Козьмина за 1815 год о расходах на ремонт Преображенской церкви // Документы и материалы по истории Кижского архитектурного ансамбля (1694–1945 гг.). Петрозаводск, 2013. С. 137.
  7. *Петтерссон Л.* Кижский погост // Научный архив музея-заповедника «Кижи». Ф. 1. Оп. 3. Ед. хр. 2738. С. 27. Л. 12.
  8. *Дело о рассмотрении плана на постройку деревянной часовни в селе Воронове Кондопожского погоста. Июль-октябрь 1851* // Национальный Архив Республики Карелии (НАРК). Ф. 3. Оп. 4. Ед. хр. 5/62. Л. 2.
  9. *Из приходно-расходной ведомости Кижской Преображенской церкви за 1892 г. о расходах на содержание Преображенской церкви* // НАРК. Ф. 25. Оп. 20. Д. 71/825. Л. 18–38.
  10. *Ополовников А.В.* Русское деревянное зодчество. Памятники шатрового типа. Памятники клетского типа и малые архитектурные формы. Памятники ярусного, кубоватого и многоглавого типа. Москва : Искусство, 1986. 308 с.
  11. *Полякова М.А.* Культурное наследие России. Сохранение и актуализация. Москва : РГГУ, 2018. 395 с.
  12. *Полякова М.А.* Подходы к изучению культурного наследия России в XVIII – начале XX века // Вестник РГГУ. Серия «Культурология. Искусствоведение. Музеология». 2008. № 10. С. 257–266.
  13. *Императорская Археологическая Комиссия (1859–1917): К 150-летию со дня основания. У истоков отечественной археологии и охраны культурного наследия / научн. ред.-сост. А.Е. Мусин ; под общ. ред. Е.Н. Носкова.* Санкт-Петербург : Дмитрий Буланин, 2009. 1184 с.
  14. *Ополовников А.В.* Памятники деревянного зодчества Карело-Финской ССР. Москва : Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1955. 192 с.
  15. *Ополовников А.В.* Реставрация памятников народного зодчества. Москва : Искусство, 1974. 391 с.
  16. *Рёскин Дж.* Семь светочей архитектуры / пер. с англ. М. Куренной, Н. Лебедевой, С. Сухарева. Санкт-Петербург : Азбука-классика, 2007. 320 с.
  17. *Riegl A.* Le culte moderne des monuments. Son essence et sa genèse // Trad. de l'allemand par Daniel Wiczorek. Avant-propos de Françoise Choay. Paris: Éditions du Seuil, 1984. 123 p.
  18. *Giovannoni G.* Saggi sull'architettura del Rinascimento. Milano, 1931. 264 p.
  19. *Памятники архитектуры в дореволюционной России: Очерки истории архитектурной реставрации / под общ. ред. А.С. Щенкова.* Москва : ТЕРРА – книжный клуб, 2002. 525 с.
  20. *Покрышкин П.П.* Краткие советы по вопросам ремонта памятников старины и искусства // Известия Археологической комиссии. 1915. Вып. 57. С. 178–190.
  21. *Бранди Ч.* Теория реставрации и другие работы по темам охраны, консервации и реставрации. Италия : Nardini Editore, 2011. 264 с.
  22. *Вахрамеев Е.В.* Некоторые методологические вопросы реставрации памятников деревянного зодчества Карелии (из опыта работ 1970–1998 годов) // Актуальные проблемы исследования и спасения уникальных памятников деревянного зодчества России : международный симпозиум. Санкт-Петербург, 1999. С. 18–24.
  23. *Кузнецова В.* На родине великого русского святого Зосимы, Соловецкого чудотворца, возведена часовня и на ней уже установлена главка с крестом. URL: <http://eparhia.karelia.ru/zagub.htm> (дата обращения: 10.03.2020).
  24. *Дульзон А.А., Лисовская Н.А., Пфайфер М., Эккерт Х.* Проблема сохранения деревянного зодчества г. Томска // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 6. С. 228–236.
  25. *Jokilehto J.* A History of Architectural Conservation: The Contribution of English, French, German and Italian Thought towards an International Approach to the Conservation of Cultural Property // D. Phil Thesis. The University of York, England. Institute of Advanced Architectural Studies. 1986. September. 466 p.

26. Okan, T., Köse, N., Arifoğlu E., Köse C. Assessing Ecotourism Potential of Traditional Wooden Architecture in Rural Areas: The Case of Papart Valley // *Sustainability*. 2016. 8 (10). 974. P. 1–17. DOI:10.3390/su8100974
27. Zdon-Korzeniowska M., Noviello, M. The Wooden Architecture Route as an Example of a Regional Tourism Product in Poland // *Sustainability*. 2019. 11. 5128. P. 1–13.
28. Незвицкая Т.В. Опыт реставрации церкви Преображения господня // *Рябининские чтения – 2019 : материалы VIII конференции по изучению и актуализации культурного наследия Русского Севера / Карельский научный центр, Государственный историко-архитектурный и этнографический музей-заповедник «Кижи»*. 2019. С. 232–236.

## REFERENCES

1. Kontseptsii sokhraneniya pamyatnikov derevyannogo zodchestva i vklucheniya ikh v kul'turnyi oborot do 2025 goda [Concepts of preservation of wooden architecture and its inclusion in the cultural turnover until 2025]. Available: [www.mkrf.ru/documents/kontsepsiya-sokhraneniya-pamyatnikov-derevyannogo-zodchestva-i-vklucheniya-ikh-v-kulturnyy-oborot](http://www.mkrf.ru/documents/kontsepsiya-sokhraneniya-pamyatnikov-derevyannogo-zodchestva-i-vklucheniya-ikh-v-kulturnyy-oborot) (accessed March 10, 2020).
2. 45 derevyannykh khramov, poteryannykh Rossiei v ogne. 1985–2018 [45 wooden temples lost in fire in Russia. 1985–2018]. Available: <http://hraniteli-nasledia.com/articles/dose/45-derevyannykh-khramov-poteryannykh-rossiey-v-ogne-1985-2018/> (accessed April 30, 2020).
3. Derevyannye tserkvi [Wooden churches]. *Zodchii*. 1872. No. 1. Pp. 2–4. (rus)
4. Khodakovskii E.V. Remonty i perestroiki pamyatnikov srednevekovogo derevyannogo zodchestva Russkogo Severa v dorestavratsionnyi period (1800–1880-e gg.) [Repairs and alterations of monuments of medieval wooden architecture of Russian North in pre-revolutionary period of 1800–1880]. In: *Seminarium Bulkianum IV: K 80-letiyu so dnya rozhdeniya Valentina Aleksandrovicha Bulkina (Seminar Bulkinyanim IV: To the 80th anniversary of birth of Valentin Aleksandrovich Bulkin)*. Saint-Petersburg: Kalamos, 2017. Pp. 360. (rus)
5. Gushchin B.A., Gushchina V.A. Iz prikhodno-raskhodnoi knigi Kizhskoi tserkvi Petrozavodskogo uezda Olonetskoi Eparkhii za 1822–1827 gg. o raskhodakh na obivku glav Preobrazhenskoi tserkvi. Dokumenty i materialy po istorii Kizhskogo arkhitekturnogo ansamblya (1694–1945 gg.) [From account book of Kizhi church of the Petrozavodsk Uyezd of Olonetsk diocese for 1822–1827 about expenses for upholstery of the Transfiguration church heads (1694–1945)]. Petrozavodsk, 2013. 137 p. (rus)
6. Gushchin B.A., Gushchina V.A. Iz knigi schetov Kizhskogo tserkovnogo starosty Petra Koz'mina za 1815 god o raskhodakh na remont Preobrazhenskoi tserkvi. Dokumenty i materialy po istorii Kizhskogo arkhitekturnogo ansamblya (1694–1945 gg.) [From account book of Peter Kozmin, Kizhi churchwarden, for 1815 about repair of Transfiguration church. Documents and materials on history of Kizhi architectural ensemble (1694–1945)]. Petrozavodsk, 2013. 137 p. (rus)
7. Nauchnyi arkhiv muzeya-zapovednika Kizhi [Archive of Kizhi Memorial Estate]. Form 1. List 3. Page 27. Proc. 12. (rus)
8. Natsional'nyi Arkhiv Respubliki Karelii. Delo o rassmotrenii plana na postroiku derevyannoi chasovni v sele Voronove Kondopozhskogo pogosta Iyul'-oktyabr' 1851 [National Archive of the Republic of Karelia]. Form 3. List 4. Proc. 2. (rus)
9. Natsional'nyi Arkhiv Respubliki Karelii. Iz prikhodno-raskhodnoi vedomosti Kizhskoi Preobrazhenskoi tserkvi za 1892 g. o raskhodakh na sodержание Preobrazhenskoi tserkvi [National Archive of the Republic of Karelia]. Form 25. List. 20. 71/825. Pp.18–38. (rus)
10. Opolovnikov A.V. Russkoe derevyannoe zodchestvo. Pamyatniki shatrovogo tipa. Pamyatniki kletskogo tipa i malye arkhitekturnye formy. Pamyatniki yarusnogo, kubovatogo I mnogoglavogo tipa [Russian wooden architecture. Pavilion-type monuments. Hard landscaping monuments. Monuments of staged, cubic and multi-cupola type]. Moscow: Iskusstvo, 1986. 308 p. (rus)
11. Polyakova M.A. Kul'turnoe nasledie Rossii. Sohranenie i aktualizatsiya [Cultural heritage of Russia. Preservation and updating]. Moscow: RGGU, 2018. 395 p. (rus)

12. Polyakova M.A. Podhody k izucheniyu kul'turnogo naslediya Rossii v XVIII – nachale XX veka [Approaches to studying cultural heritage of Russia in the 18th and early 20th centuries]. *Vestnik RGGU*. 2008. No. 10. Pp. 257–266. (rus)
13. Musin A.E., Noskov E.N. (Ed.) Imperatorskaya Arkheologicheskaya Komissiya (1859–1917): K 150-letiyu so dnya osnovaniya. U istokov otechestvennoi arkheologii i okhrany kul'turnogo naslediya [Imperial Archaeological Commission (1859–1917): The 150th anniversary of its foundation. Origins of domestic archeology and protection of cultural heritage]. Saint-Petersburg: Dmitrii Bulanin, 2009. 1184 p. (rus)
14. Opolovnikov A.V. Pamyatniki derevyannogo zodchestva Karelo-finskoi SSR [Monuments of wooden architecture of the Karelian-Finnish SSR]. Moscow: Stroizdat, 1955. 192 p. (rus)
15. Opolovnikov A.V. Restavraciya pamyatnikov narodnogo zodchestva [Restoration of monuments of folk architecture]. Moscow: Iskusstvo, 1974. 391 p. (rus)
16. Ruskin J. Sem' svetochei arkhitektury [The seven lamps of architecture]. St.-Petersburg: Azbuka-klassika, 2007. 320 p. (transl. from Engl.)
17. Riegl A. Le culte moderne des monuments. Son essence et sa genèse. In: Trad. de l'allemand par Daniel Wieczorek. Avant-propos de Françoise Choay. Paris: Éditions du Seuil, 1984. 123 p.
18. Giovannoni G. Saggi sull'architettura del Rinascimento. Milano, 1931. 264 p.
19. Shchenkov A.S. (Ed.) Pamyatniki arkhitektury v dorevolutsionnoi Rossii: Ocherki istorii arkhitekturnoi restavratsii [Monuments in pre-revolutionary Russia: Essays on the history of architectural restoration]. Moscow: TERRA – knizhny klub, 2002. 525 p. (rus)
20. Pokryshkin P.P. Kratkie sovery po voprosam remonta pamyatnikov stariny i iskusstva. Izvestiya Arkheologicheskoi komissii Izvestiya Arheologicheskoi komissii [Brief advice on repairing monuments of antiquity and art]. *Izvestiya Arkheologicheskoi Komissii*. 1915. No. 57. Pp. 178–190. (rus)
21. Brandi C. Teoriya restavratsii i drugie raboty po temam ohrany, konservatsii i restavratsii [Theory of restoration]. Italiya: Nardini Editore, 2011. 264 p. (transl. from It.)
22. Vakhrameev E.V. Nekotorye metodologicheskie voprosy restavratsii pamyatnikov derevyannogo zodchestva Karelii (iz opyta rabot 1970–1998 godov) [Methodological questions of wooden monuments restoration in Karelia (from experience of 1970–1998)]. In: Aktual'nye problemy issledovaniya i spaseniya unikal'nykh pamyatnikov derevyannogo zodchestva Rossii, mezhdunarodnyi simpozium (*Proc. Int. Symp. 'Relevant Problems Preservation of Unique Wooden Monuments of Russia'*). Saint-Petersburg, 1999. Pp. 18–24. (rus)
23. Kuznetsova V. Na rodine velikogo russkogo svyatogo Zosimy, Soloveckogo chudotvorca, vozvedena chasovnya i na nej uzhe ustanovlena glavka s krestom [Homeland of Zosima, the great Russian saint, Solovetsky miracle worker]. Available: <http://eparhia.karelia.ru/zagub.htm> (accessed March 10, 2020).
24. Dul'zon A.A., Lisovskaya N.A., Pfajfer M., Ehkkert Kh. Problema sokhraneniya derevyannogo zodchestva g. Tomska [The problem of preservation of wooden architecture in Tomsk]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2010. V. 317. No. 6. Pp. 228–236. (rus)
25. Jokilehto J. A History of architectural conservation: The contribution of English, French, German and Italian thought towards an International approach to the conservation of cultural property. PhD Thesis. The University of York, England, Institute of Advanced Architectural Studies. 1986. 466 p.
26. Okan, T., Köse, N., Arifoğlu E., Köse C. Assessing ecotourism potential of traditional wooden architecture in rural areas: The case of Papart Valley. *Sustainability*. 2016. V. 974. No. 8 (10). Pp. 1–17.
27. Zdon-Korzeniowska M., Noviello M. The wooden architecture route as an example of a regional tourism product in Poland. *Sustainability*. 2019. V. 5128. No. 11. Pp. 1–13.
28. Nezvitskaya T.V. Opyt restavratsii cerkvi Preobrazheniya gospodnya [Restoration experience of Transfiguration church]. In: Ryabininskie chteniya – 2019: materialy VIII konferentsii po izucheniyu i aktualizatsii kul'turnogo naslediya Russkogo Severa (*Proc. 8th Conf. on Studying and Updating Cultural Heritage of Russian North in memory of Ryabinin 'Ryabinin Readings-2019'*). Petrozavodsk, 2019. Pp. 232–236. (rus)

**Сведения об авторе**

*Незвицкая Татьяна Викторовна*, аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4; Государственный историко-архитектурный и этнографический музей-заповедник «Кижи», 185035, г. Петрозаводск, пл. Кирова, 10, nezv@yandex.ru

**Author Details**

*Tat'yana V. Nezvitskaya*, Research Assistant, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia; Kizhi State Historical, Architectural and Ethnographic Memorial Estate, 10, Kirov Sq., Petrozavodsk, 185035, Russia; nezv@yandex.ru

УДК 728.83

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-23-36

М.В. ЖАРИКОВА,  
Сибирский федеральный университет

## АРХИТЕКТУРНЫЙ КОМПЛЕКС «УСАДЬБА БАЛАНДИНА» В Г. ЕНИСЕЙСКЕ: АРХИТЕКТУРНЫЙ, АРХЕОЛОГИЧЕСКИЙ, ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ

В статье представлен результат комплексного анализа архитектурного комплекса «Усадьба Баландина», расположенного по ул. Ленина, 103, г. Енисейска. Актуальность исследования обусловлена малой изученностью. До настоящего времени дошло незначительное количество информации о времени строительства данного комплекса.

Цель исследования – на основе изучения ранее известных и вновь выявленных источников восстановить картину становления и развития архитектуры первого русского города в Центральной Сибири – Енисейска.

Как показала практика, применение традиционно-типологического метода для датирования данного комплекса не позволило установить детальную историю застройки, однако, согласно предварительной архитектурной датировке, он относится к концу XVIII в. Привлечение дендрохронологического метода стало выходом из этой ситуации. Результатом проведенной работы стало установление календарного времени сооружения построек вокруг архитектурного объекта «Усадьба Баландина», самая ранняя из которых датируется 1846 г., а поздняя – 1864 г. Проведенные работы позволили предварительно датировать исследованные культурные слои второй пол. XVIII–XIX в.

Результаты исследований закладывают прочную основу для проведения последующих календарных датировок древесины из археологических и архитектурных памятников Енисейска. Данный материал может быть интересен для подготовки лекций и докладов по истории архитектуры Сибири.

**Ключевые слова:** историко-культурное наследие; археологические памятники; архитектура; дендрохронология; датировка; древесина; археология; Енисейск; острог.

**Для цитирования:** Жарикова М.В. Архитектурный комплекс «Усадьба Баландина» в г. Енисейске: архитектурный, археологический, дендрохронологический аспекты // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 4. С. 23–36.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-23-36

M.V. ZHARIKOVA  
Siberian Federal University

## ARCHITECTURAL COMPLEX "BALANDIN'S MANOR" IN YENISEYSK: ARCHITECTURAL, ARCHEOLOGICAL AND DENDROCHRONOLOGICAL ASPECTS

The article presents the analysis of the architectural complex "Balandin's Manor" in Yeniseisk, which is little investigated and information about its construction time is very poor.

**Purpose:** The aim of the work is to study the formation and development of architecture of Yeniseisk, the first Russian city in Central Siberia, using previously known and newly discovered data. **Methodology/Approaches:** The dendrochronological approach is used in this work.

**Findings:** Although the traditional typological approach does not allow to establish the time of foundation and detailed history of this complex, it is found that it refers to the end of the 18th century. The time of construction of the "Balandin's Manor" varies between the years 1846–1864. The work carried out allowed preliminary dating of the examined cultural layers of the second floor. The approximate date determined in this work is the 18-19th centuries.

**Practical implications:** The research results lay a solid foundation for subsequent calendar dating of wood from archeological and architectural monuments of Yeniseisk, and can be used in lectures and reports on the history of architecture in Siberia.

**Keywords:** historical and cultural legacy; archeological monuments; architecture; dendrochronology; dating; wood; archeology; Yeniseisk; prison.

**For citation:** Zharikova M.V. Arkhitekturnyi kompleks «Usad'ba Balandina» v g. Eniseiske: arkhitekturnyi, arkheologicheskii, dendrokhnologicheskii aspekty [Architectural complex "Balandin's Manor" in Yeniseysk: architectural, archeological and dendrochronological aspects]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 4. Pp. 23–36.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-23-36

### Введение

В начале XIX в. Енисейск считался одним из красивейших городов Сибири. Городская застройка панорамной композицией наиболее впечатляюще воспринималась с водной глади Енисея. Отсюда среди бескрайнего массива таежных сибирских лесов перед взором путешественников открывались «белые башни и дома» Енисейска. Благородный, чистый белый цвет в сочетании с обильной зеленью и малоэтажной застройкой, перезвон колоколов создавали незабываемый образ сибирского города [6, с. 73].

Енисейск – первый русский город в Центральной Сибири – был основан в 1619 г. По сведениям известного ученого-историка XVIII в. Г.Ф. Миллера, «вначале это был лишь маленький четырехугольный острог, который не имел иной цели, кроме сбора ясака с живущих вниз по Енисею остяков и с тех тунгусов, которые заселяли местности восточнее реки Енисея» [Там же, с. 8]. По упоминаниям Ин. Архангельского следует, что «Енисейский острог 1618 года состоял из нескольких зимовьев, обнесенных частоколом, позже острог был укреплен тремя башнями стрельницами».

Сведения о дальнейшей застройке г. Енисейска отражены в трудах авторов: историка А.Н. Копылова «Русские на Енисее в XVII в. (1965), историка архитектуры В.И. Кочедамова «Первые русские города Сибири» (1977), Т.С. Проскуряковой «Енисейск в XVII–XVIII вв.» (1984).

В работе «Енисейск в XVII–XVIII вв.» Т.С. Проскурякова упоминает о влажном климате, частых наводнениях и пожарах, которые быстро приводили деревянный Енисейск в ветхое состояние, именно эти обстоятельства и способствовали укреплению острога. Большой вклад в историю внесла работа «Чертежная книга Сибири» сибирского архитектора, историка и картографа С.У. Ремезова (издана в России в 1882 г.) Рисунок «земли Енисейского города» (рис. 1) можно отнести к первому из обнаруженных графических документов о городе того времени [Там же, с. 14].





Рис. 1. Чертеж земли Енисейского города из «Служебной чертежной книги» С.У. Ремезова. XVIII в.

Из современных исследований стоит отметить работу В.И. Царева и Н.В. Можайцевой «Градостроительная летопись Енисейска XVII–XX веков» (2005). В настоящем исследовании предлагается рассмотреть более подробно историко-архитектурный комплекс «Усадьба Баландина», сохранивший до настоящего времени большую часть исторической застройки.

### Архитектурно-этнографическое обследование

В настоящее время в старинном сибирском г. Енисейске на территории левого низменного берега р. Енисей в Восточной Сибири сохранилось значительное количество архитектурных памятников.

Особый интерес представляют архитектурные ансамбли, являющие собой группы сооружений, составляющих единое целое, подчиненное единому ритму [2, с. 56]. Такие постройки являются уникальными источниками информации об истории города, жителях, строительных традициях. Объект культурного наследия «Усадьба Баландина» признан памятником федерального значения и расположен в историческом центре г. Енисейска по адресу Красноярский край, г. Енисейск, ул. Ленина, 103 (рис. 2). К сожалению, до настоящего времени дошло незначительное количество информации об этих постройках. Однако комплексный подход, основанный на симбиозе архитектурного, археологического и дендрохронологического методов, позволил выполнить историческое и архитектурное описание, а также установить календарную дату построек этого памятника.



Рис. 2. Объект культурного наследия «Усадьба Баландина». г. Енисейск. Фото М.В. Жариковой, 2016 г.

Ансамбль «Усадьбы Баландина» формирует главную площадь города и является важной частью сохранившейся исторической застройки. Усадьба занимает северо-восточную часть большого квартала, расположенного между улицами Ленина, Кирова, Бабкина и Партизанским переулком (рис. 3) [1, с. 130].

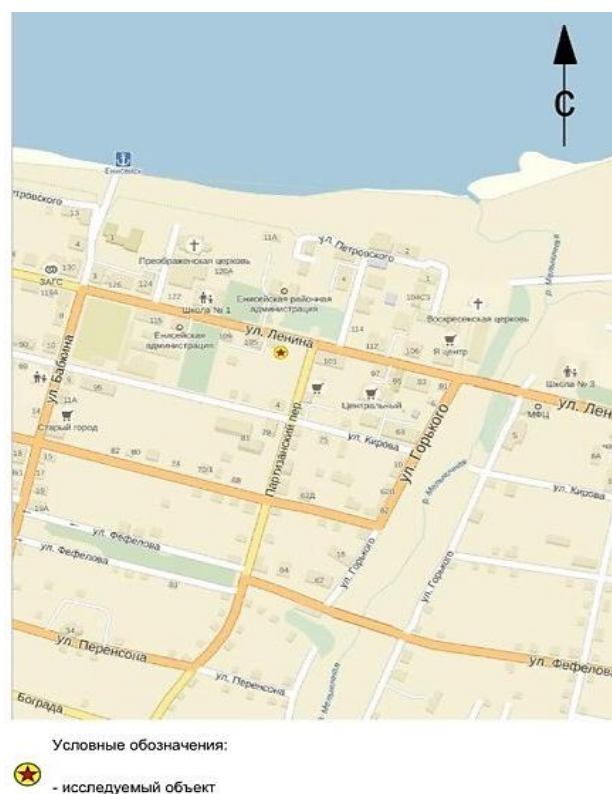


Рис. 3. Енисейск, ул. Ленина, 103. Объект культурного наследия «Усадьба Баландина»

Ансамбль усадьбы формируется зданиями дома с лавками, флигеля и пакгауза. Здания дома и торговых лавок выполнены в стиле классицизм и принадлежали купцу первой гильдии, потомственному гражданину города Ф. Баландину.

Дом Баландина с лавками занимает северную часть усадьбы, флигель расположен на западной границе, а пакгауз занимает южную границу усадьбы. Общая площадь усадьбы Баландина составляет 1573,10 м<sup>2</sup>. Из них дом с лавками Ф. Баландина занимает 704,20 м<sup>2</sup>, флигель – 144,40 м<sup>2</sup>, пакгауз – 724,50 м<sup>2</sup>.

Дом с лавками принадлежит к числу основных и самых известных построек усадьбы Баландина [3, с. 32]. Своим главным северным фасадом здание поставлено по красной линии ул. Ленина (бывшей Большой). В настоящее время оно представляет собой одно вытянутое в длину строение. Однако первоначально здание состояло из двух изолированных построек, которые были куплены Ф. Баландиным в разное время у разных владельцев, а затем объединены между собой. Первыми были куплены одноэтажные каменные лавки, располагавшиеся в угловой северо-восточной части участка, другая часть дома с лавками – одноэтажные каменные магазины – были построены в 1834–1838 гг. енисейским купцом Ф.Д. Дементьевым. В 1866 г. А.С. Баландин купил эти постройки, объединив два различных здания в один объем. После пожара 1869 г. над первым этажом был надстроен деревянный этаж, на котором располагались жилые комнаты.

Пакгауз представляет собой двухэтажное кирпичное здание, главный торцевой фасад которого ориентирован на Партизанский переулок, 9 (рис. 4). Здание было выстроено самими купцами Баландиными. Оно объединяет в себе два разных по назначению объёма – восточная часть пакгауза предназначалась под жилые помещения, западная (большая часть здания) – под склад. Самой большей частью усадьбы Ф. Баландина был флигель. При Баландиных в 70–80-е гг. XIX в. над первым этажом флигеля был надстроен второй. На его восточном фасаде располагались шесть оконных проёмов, а западный, обращённый в сторону соседнего участка, был глухим.



Рис. 4. Объект культурного наследия «Усадьба Баландина». г. Енисейск. Фото М.В. Жариковой, 2016 г.

Здание относится к историко-революционным памятникам. В настоящее время угол дома украшает мемориальная доска с надписью: «Здесь в 1917 г. помещался Совет рабочих, солдатских и крестьянских депутатов» [3, с. 43].

### **Археологические и дендрохронологические исследования**

В 2016 г. сотрудниками ООО «Красноярская Геоархеология» были проведены спасательные полевые археологические работы по сохранению всероссийского археологического наследия «Енисейск. Енисейское городище» при проведении ремонтно-реставрационных работ на объекте культурного наследия «Усадьба Баландина, сер. XIX в.», расположенного в историческом центре г. Енисейска по адресу Красноярский край, г. Енисейск, ул. Ленина, 103. Исследования культурного слоя на раскопе были доведены до материка.

Археологические артефакты, найденные при разборе культурных слоев, представлены следующим массовым материалом – фрагментами керамики, в том числе лощёной и поливной, фаянса и фарфора, костными останками животных, коваными гвоздями и скобами, металлическими пластинками и обрезками, бутылочным и оконным стеклом, слюдой, обрезками кожи. Из индивидуальных находок следует отметить нумизматический материал XVIII–XIX вв., серебряные копейки XVII в., нательные крестики, стеклянные бусины и медальоны, изделия из кожи и бересты, фрагменты керамических сосудов, фаянсовой и фарфоровой посуды, деревянные изделия, изразцы. В процессе работ на различных участках раскопа был зафиксирован ряд остатков разновременных деревянных и кирпичных конструкций (XVII–IX вв.) [Там же, с. 37].

### **Дендрохронологическое датирование**

Осуществление стандартной методики дендрохронологической датировки памятника, содержащего древесину, предполагает наличие двух составляющих – привязанной к календарной шкале обобщенной индексированной хронологии по району исследования и построенной по памятнику (плавающей) древесно-кольцевой хронологии (ДКХ) [5, с. 40–46]. Успешность датировки любого памятника во многом определяется тем, насколько качественно была сформирована коллекция образцов археологической древесины. Учитывая, что археологические работы по изучению памятников проводятся на протяжении нескольких лет, необходимо формировать полные коллекции археологической древесины по каждому сезону раскопок, что позволяет воссоздать детальную картину застройки и дать хронологическую привязку культурным слоям [Там же, с. 40–46].

Важным моментом является вопрос о количестве образцов, необходимых для надежной датировки памятника истории. Как показала практика, если есть возможность, то необходимо отобрать максимально возможное их количество (по одному с каждого элемента конструкции). В дальнейшем это позволит не только надежно установить время рубки деревьев для постройки, но и, возможно, выявить следы более поздних перестроек отдельных элементов сооружения [4, с. 112]. Минимальное количество образцов зависит в первую очередь от особенностей региона исследования и объектов изучения. Вместе с тем желательно отбирать не менее 10 образцов с одного объекта исследования.

При датировке археологической и исторической древесины огромное значение имеет выявление последнего наружного годичного кольца. В случае если на наружной части спила сохранились остатки коры и отсутствуют следы повреждений личинками короедов, то год и сезон заготовки древесины определяется легко, без особых сложностей.

Существует необходимость проведения тщательной зачистки торцевой поверхности образца, поскольку в противном случае, если определять последнее подкорковое кольцо только по гладкой боковой поверхности спила, можно допустить серьезную ошибку [4, с. 113].

Таким образом, применение дендрохронологического метода позволяет привнести в изучение памятников четвертое измерение – «календарное время», то есть показать с точностью до года (а в ряде случаев – до сезона) время заготовки древесины для возведения объекта культурного наследия. Учитывая, что часть архитектурных и археологических памятников Сибири состоят или включают в себя элементы деревянных конструкций, в перспективе имеется широкое поле деятельности для применения дендрохронологического метода.

Для уточнения предварительных архитектурных датировок «Усадьбы Баландина» была проведена работа по отбору дендрохронологических спилов с объекта. Было взято 74 спила с жилых и хозяйственных сооружений. Камеральная обработка образцов, измерения ширины годичных колец производились на полуавтоматической установке LINTAB (с точностью 0,01 мм). Измеренные серии прироста датировались посредством сочетания графической перекрестной датировки [7] и кросс-корреляционного анализа в специализированном программном пакете для дендрохронологических исследований – DPL [8]. В процессе пробоподготовки из коллекций археологической древесины были исключены образцы, содержащие менее 70 колец и кренивую древесину.

Исходя из степени сохранности древесины и наполненности коллекций образцами, были проанализированы коллекции, отобранные по материалам раскопок в 2015 г. на историко-археологическом памятнике «Усадьба Баландина». Всего было проанализировано десять построек, одна из которых не имеет данных, и два частокла (таблица).

#### Характеристика образцов археологической древесины

| №                  | Шифр   | Описание                                                                                                        | Последнее сохранившееся кольцо (год) | Порода | Подкорковый слой |
|--------------------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------|------------------|
| <b>Постройка 2</b> |        |                                                                                                                 |                                      |        |                  |
| 1                  | ENS_28 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015. Спил № 13, столб № 3. Квадрат Ц/24, постройка 2. Слой – навоз со щепой | 1841                                 | Сосна  | Нет              |
| 2                  | ENS_35 | Дом Баландина, раскоп 1/2015. Спил № 15. Столб № 1, постройка № 2. Квадрат Ц/24. Слой – навоз со щепой          | 1840                                 | Сосна  | Есть             |

Продолжение таблицы

| №                  | Шифр   | Описание                                                                                                                           | Последнее со-<br>хранившееся<br>кольцо (год) | Поро-<br>да           | Подко-<br>ровый<br>слой |
|--------------------|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| <b>Постройка 3</b> |        |                                                                                                                                    |                                              |                       |                         |
| 3                  | ENS_07 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 3/2015. Спил № 28, постройка № 3 (заплот). Квад-<br>рат Ч/40. Слой – серый суглинок               | <b>1864</b>                                  | Лист-<br>венни-<br>ца | Есть                    |
| 4                  | ENS_20 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015. Спил № 26, столб № 6, постройка 3. Квад-<br>рат 4/43. Слой – серый суглинок               | <b>1864</b>                                  | Лист-<br>венни-<br>ца | Есть                    |
| 5                  | ENS_43 | Дом Баландина, раскоп 1/ 2015. Спил № 9. Столб № 3, постройка № 3А, квадрат Х/43                                                   | 1862                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Есть                    |
| 6                  | ENS_45 | Дом Баландина, раскоп 1/2015. Спил № 30; столб № 10. Постройка № 3, квад-<br>рат Ч/40. Слой – навоз с щепой                        | <b>1864</b>                                  | Лист-<br>венни-<br>ца | Есть                    |
| 7                  | ENS_55 | Дом Баландина, раскоп 1/2015. Спил № 27, столб № 7, построка № 3. Квадрат Ч/43. Слой – серый суглинок                              | 1860                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Есть                    |
| 8                  | ENS_79 | Дом Баландина, раскоп 1/2015. Спил № 10, столб № 2, квадрат Х/44, постройка № 3А                                                   | 1863                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Есть                    |
| 9                  | ENS_06 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 3/2015. Спил № 38, постройка № 3 (заплот). Квад-<br>рат Ч/39-40. Слой – суглинок со свежей глиной | 1833                                         | Сосна                 | Нет                     |
| 10                 | ENS_10 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 3/2015. Спил № 17, постройка № 3 (заплот). Квад-<br>рат Ш/39. Слой – навоз со щепой               | 1810                                         | Сосна                 | Нет                     |
| 11                 | ENS_21 | Дом Баландина, раскоп 1/2015. Спил № 7, столб № 1, п. № 3а (внутри п. № 3). Квад-<br>рат Ф/43. Слой – навоз со щепой               | 1862                                         | Сосна                 | Есть                    |
| 12                 | ENS_51 | Дом Баландина, раскоп 1/2015. Спил № 11, столб № 4, постройка № 3. Квадрат Х/42. Слой – навоз                                      | 1843                                         | Сосна                 | Есть                    |
| 13                 | ENS_73 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015. Спил № 20, нижний венец, п. № 3, квадрат Ч/39. Слой – углистый слой                       | 1825                                         | Сосна                 | Нет                     |
| 14                 | ENS_74 | Дом Баландина, раскоп 1/2015. Спил № 16. Столб № 8, постройка № 3. Квадрат Ч/44. Слой – навоз                                      | 1842                                         | Сосна                 | Нет                     |



## Продолжение таблицы

| №                  | Шифр   | Описание                                                                                                                                 | Последнее со-<br>хранившееся<br>кольцо (год) | Поро-<br>да           | Подко-<br>ровый<br>слой |
|--------------------|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 15                 | ENS_89 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015. Спил № 8, столб № 5, постройка № 3А (внутри постройки № 3). Квадрат Ч/43. Слой – навоз со щепой | 1863                                         | Сосна                 | Нет                     |
| <b>Постройка 4</b> |        |                                                                                                                                          |                                              |                       |                         |
| 16                 | ENS_32 | Дом Баландина, раскоп 1/2015. Спил № 29. Южный, нижний венец постройка 4. Квадрат Ф/39. Слой – навоз со щепой                            | 1833                                         | Сосна                 | Нет                     |
| 17                 | ENS_57 | Дом Баландина, раскоп 1/2015. Спил № 18, восточное бревно, постройка № 4. Квадрат Ч/35. Слой – щепы с органикой                          | 1828                                         | Сосна                 | Нет                     |
| 18                 | ENS_86 | Дом Баландина, раскоп 1/2015. Спил № 34, стул № 4. Постройка № 4, под южным венцом. Квадрат Ч/39. Слой – серый суглинок                  | 1833                                         | Сосна                 | Есть                    |
| <b>Постройка 5</b> |        |                                                                                                                                          |                                              |                       |                         |
| 19                 | ENS_09 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 3/2015. Спил № 100, постройка № 5 (заплот). Квадрат Ю/31                                                | 1828                                         | Сосна                 | Нет                     |
| <b>Постройка 7</b> |        |                                                                                                                                          |                                              |                       |                         |
| 20                 | ENS_11 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015. Спил № 71, постройка 7, юго-восточный угол. Квадрат Е'/38                                       | 1864                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Есть                    |
| 21                 | ENS_26 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015. Спил № 68, постройка № 7, южное бревно. Квадрат Л'/39                                           | 1864                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Есть                    |
| 22                 | ENS_48 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015. Спил № 70. Постройка 7, юго-восточный угол. Квадрат Л'/38-39                                    | 1864                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Есть                    |
| 23                 | ENS_49 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 3/2015. Спил № 99, северная стенка, постройка 7. Квадрат Л'/32                                          | 1864                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Есть                    |
| 24                 | ENS_53 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015. Спил № 67, постройка № 7. Квадрат Е'/37, серый песок                                            | 1864                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Есть                    |
| 25                 | ENS_40 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/ 2015. Спил № 72. Столб к востоку от постройки № 7. Квадрат Л'–М'/36                                  | 1845                                         | Сосна                 | Есть                    |

Продолжение таблицы

| №                            | Шифр   | Описание                                                                                                             | Последнее со-<br>хранившееся<br>кольцо (год) | Поро-<br>да           | Подко-<br>ровый<br>слой |
|------------------------------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| <b>Постройка 8</b>           |        |                                                                                                                      |                                              |                       |                         |
| 26                           | ENS_59 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015. Спил № 95, постройка 8. Первое бревно южной стенки. Квадрат М'/37           | 1848                                         | Сосна                 | Есть                    |
| 27                           | ENS_71 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2 /2015. Спил № 94, постройка 8, 1 бревно запад-<br>ной стены. Квадрат Н'/39        | 1839                                         | Сосна                 | Нет                     |
| 28                           | ENS_83 | Дом Баландина, раскоп 1/2015, участок 2, номер 96. Постройка 8, бревно восточной<br>стены. Квадрат П'/37             | 1846                                         | Сосна                 | Нет                     |
| <b>Постройка 9</b>           |        |                                                                                                                      |                                              |                       |                         |
| 29                           | ENS_15 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015. Спил № 32, столб № 9, постройка 9. Квад-<br>рат Ч/40. Слой – навоз со щепой | 1863                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Есть                    |
| <b>Постройка 10</b>          |        |                                                                                                                      |                                              |                       |                         |
| 30                           | ENS_13 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015. Спил № 69, постройка № 10 (стул). Квад-<br>рат Б'-В'/40                     | 1864                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Есть                    |
| <b>Частокол 1</b>            |        |                                                                                                                      |                                              |                       |                         |
| 31                           | ENS_42 | Дом Баландина, раскоп 1/15. Спил № 62. Столб 7, частокол № 1. Квадрат Ш/38. Слой – навоз                             | 1792                                         | Сосна                 | Нет                     |
| 32                           | ENS_50 | Дом Баландина, раскоп 1/2015. Спил № 63, столб № 8, частокол № 1. Квадрат Ц/43. Слой – навоз                         | 1789                                         | Сосна                 | Нет                     |
| <b>Частокол 3+ частокол?</b> |        |                                                                                                                      |                                              |                       |                         |
| 33                           | ENS_14 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015. Спил № 92, частокол 3, квадрат С'/36                                        | 1845                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Нет                     |
| 34                           | ENS_31 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015. Спил № 88. Частокол 3. Кв 4'/39                                             | 1844                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Нет                     |
| 35                           | ENS_33 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 3/2015. Частокол 3. Квадрат Р'/32                                                   | 1846                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Есть                    |
| 36                           | ENS_36 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015. Спил № 9, частокол 3. Квадрат С'/36                                         | 1846                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Нет                     |



## Продолжение таблицы

| №                           | Шифр   | Описание                                                                                        | Последнее со-<br>хранившееся<br>кольцо (год) | Поро-<br>да           | Подко-<br>ровый<br>слой |
|-----------------------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 37                          | ENS_41 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015.<br>Спил № 82. Часток 3, квадрат Д'/39                  | 1845                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Нет                     |
| 38                          | ENS_65 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015.<br>Спил № 74, часток 3. Квадрат И'/38                  | 1845                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Нет                     |
| 39                          | ENS_66 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015.<br>Спил № 75, часток 3. Квадрат К'/39                  | <b>1846</b>                                  | Лист-<br>венни-<br>ца | Есть                    |
| 40                          | ENS_76 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015.<br>Спил № 87, часток 3. Квадрат Т'/39                  | <b>1846</b>                                  | Лист-<br>венни-<br>ца | Есть                    |
| 41                          | ENS_80 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015.<br>Спил № 83, часток 3. Квадрат Г'/35                  | <b>1849</b>                                  | Лист-<br>венни-<br>ца | Нет                     |
| 42                          | ENS_81 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015.<br>Спил № 76, часток 3. Квадрат К'/38                  | <b>1848</b>                                  | Лист-<br>венни-<br>ца | Есть                    |
| 43                          | ENS_01 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015.<br>Спил № 89, часток 3. Квадрат С'/39                  | 1843                                         | Сосна                 | Нет                     |
| 44                          | ENS_02 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 3/2015.<br>Спил № 89, постройка 14, часток 3.<br>Квадрат Г'/31 | 1845                                         | Сосна                 | Нет                     |
| 45                          | ENS_08 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015.<br>Спил № 73, часток № 3 (заплот). Квад-<br>рат Д'/39  | 1752                                         | Сосна                 | Нет                     |
| 46                          | ENS_23 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015.<br>Спил № 86, часток 3 (под трубой).<br>Квадрат Р'/39  | 1844                                         | Сосна                 | Нет                     |
| 47                          | ENS_24 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2. Спил<br>№ 85, часток 3. Квадрат Д'/39                       | <b>1845</b>                                  | Сосна                 | Есть                    |
| 48                          | ENS_27 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015.<br>Спил № 77, часток № 3. Квадрат И'/39                | 1844                                         | Сосна                 | Нет                     |
| 49                          | ENS_62 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015,<br>часток 3. Квадрат З'/38                             | <b>1845</b>                                  | Сосна                 | Есть                    |
| <b>Постройка неизвестна</b> |        |                                                                                                 |                                              |                       |                         |
| 50                          | ENS_17 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015.<br>Спил № 101. Квадрат Е'/30                           | 1835                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Нет                     |

Окончание таблицы

| №  | Шифр   | Описание                                                                                                              | Последнее со-<br>хранившееся<br>кольцо (год) | Поро-<br>да           | Подко-<br>ровый<br>слой |
|----|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 51 | ENS_44 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 3/2015. Спил № 102. Квадрат Л/32                                                     | 1845                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Нет                     |
| 52 | ENS_67 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 3. Квадрат Л/32                                                                      | 1845                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Нет                     |
| 53 | ENS_70 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 3/2015. Квадрат Р/30                                                                 | 1840                                         | Лист-<br>венни-<br>ца | Нет                     |
| 54 | ENS_03 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 3/2015. Спил № 37, бревно между частоколом № 4 Квадрат Ш/40. Слой – углистый слой    | 1718                                         | Сосна                 | Нет                     |
| 55 | ENS_12 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015. Спил № 39. Квадрат Ц/44. Слой – черный суглинок                              | 1793                                         | Сосна                 | Нет                     |
| 56 | ENS_19 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 3/2015. Спил № 103. Квадрат П/32                                                     | 1846                                         | Сосна                 | Есть                    |
| 57 | ENS_29 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2. Спил № 107                                                                        | 1847                                         | Сосна                 | Нет                     |
| 58 | ENS_37 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015. Спил № 98, кв. Ю/39/                                                         | 1781                                         | Сосна                 | Нет                     |
| 59 | ENS_39 | Дом Баландина, раскоп 1/2015. Номер 2, спил, бревно с пазом. Квадрат Х/27. Слой – навоз                               | 1858                                         | Сосна                 | Есть                    |
| 60 | ENS_54 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015. Спил № 3. Отдельное бревно. Квадрат Ш/37. Слой – крупная светлая щепы        | 1867                                         | Сосна                 | Да                      |
| 61 | ENS_85 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015. Спил № 22, столб № 20. Квадрат Ц/40                                          | 1857                                         | Сосна                 | Есть                    |
| 62 | ENS_88 | Дом Баландина, раскоп 1, участок 2/2015. Спил № 14, столб № 2, постройка. Квад-<br>рат Ш/26. Слой № 2, навоз со щепой | 1841                                         | Сосна                 | Есть                    |

Результатом проведенной работы стало установление календарного времени сооружения построек вокруг архитектурного объекта «Усадьба Баландина», самая ранняя из которых датируется серединой XIX в. (1846 г.), а поздняя из них – концом XIX в. (1864 г.). Проведенные работы позволили предварительно датировать исследованные культурные слои второй пол.

XVIII–XIX в. В результате исследований были получены ранее неизвестные данные о деревянной застройке исследуемого участка до строительства здесь каменного строения, а также впервые было выполнено дендрохронологическое датирование 62 образцов с объекта «Усадьба Баландина».

В результате комплексного анализа было проведено детальное описание архитектурного ансамбля «Усадьба Баландина» и установлено календарное время его основания – вторая половина XIX в. Результаты исследований закладывают прочную основу для проведения последующих календарных датировок древесины из археологических и архитектурных памятников г. Енисейска.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буланков В.В., Шумов К.Ю. Енисейск: очерки по истории развития и застройки города. Красноярск : Книжное изд-во, 1999. 214 с.
2. Горкин А.П. Искусство. Современная иллюстрированная энциклопедия. Москва : Росмэн, 2007. 608 с.
3. Лысенко Д.Н., Галухин Л.Л., Визгалов Г.П. Краткий научно-технический отчет о выполнении спасательных археологических полевых работ по сохранению выявленного объекта археологического наследия «Енисейск. Енисейское городище». Нефтеюганск, 2015. 88 с.
4. Мыглан В.С., Жарников З.Ю. Датирование исторических памятников Сибири дендрохронологическим методом. Методический аспект // Культура русских в археологических исследованиях : сб. науч. ст.: в 2 т. / под ред. Л.В. Татауровой, В.А. Борзунова. Омск ; Тюмень ; Екатеринбург : Магеллан, 2014. Т. I. 320 с.
5. Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазепа В.С., Наурзбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск : КрасГУ, 2000. 80 с.
6. Царев В.И., Можайцева Н.В. Градостроительная летопись Енисейска XVII–XX веков. Красноярск : КрасГАСА, 2005. 163 с.
7. Douglass A.E. Climatic cycles and tree-growth. A study of the annual rings of trees in relation to climate and solar activity. V. 1. Washington: Carnegie Inst., 1919. 127 p.
8. Holmes R.L. Dendrochronological Program Library. Laboratory of Tree-ring Research. Tucson: The University of Arizona, 1983. 51 p.

#### REFERENCES

1. Bulankov V.V., Shumov K.Yu. Eniseisk: ocherki po istorii razvitiya i zastroiki goroda [Yeniseisk: the history of city development and construction]. Krasnoyarsk, 1999. 214 p. (rus)
2. Gorkin A.P. Iskustvo. Sovremennaya illyustrirovannaya entsiklopediya [Art. Modern illustrated encyclopedia]. Moscow: Rosmen, 2007. 608 p. (rus)
3. Lysenko D.N., Galukhin L.L., Vizgalov G.P. Kratkii nauchno-tehnicheskii otchet o vypolnenii spasatel'nykh arkhologicheskikh polevykh rabot po sokhraneniyu vyyavlennoogo ob'ekta arkhologicheskogo naslediya "Eniseisk. Eniseiskoe gorodishche" [Brief research report on the implementation of field works on preservation of archaeological heritage "Yeniseisk ancient settlement"]. Nefteyugansk, 2015. 88 p. (rus)
4. Myglan V.S., Zharnikov Z.Yu. Datirovanie istoricheskikh pamyatnikov Sibiri dendrokhnologicheskim metodom. Metodicheskii aspekt [Dating of historical monuments of Siberia using dendrochronological method. Methodological aspect]. In: Kul'tura russkikh v arkhologicheskikh issledovaniyakh [Russian culture in archeological research], in 2 vol. 1, L.V. Tataurova, V.A. Borzunov, Eds., Omsk; Tyumen; Ekaterinburg: Magellan, 2014. 320 p. (rus)
5. Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirdyanov A.V., Kругlov V.B., Mazepa V.S., Naurzbaev M.M., Khantemirov R.M. Metody dendrokhnologii. Osnovy dendrokhnologii. Sbor i poluchenie drevesno-kol'tsevoi informatsii [Methods of dendrochronology. Basics of dendrochronology. Gathering and acquisition of wood-ring information]. Krasnoyarsk: KrasGU, 2000. 80 p. (rus)

6. Tsarev V.I., Mozhaitseva N.V. Gradostroitel'naya letopis' Eniseiska XVII–XX vekov [Town-planning chronicle of Yeniseisk in the 17–20th centuries]. Krasnoyarsk, 2005. 163 p. (rus)
7. Douglass A.E. Climatic cycles and tree-growth. A study of the annual rings of trees in relation to climate and solar activity, vol. 1. Washington: Carnegie Inst., 1919. 127 p.
8. Holmes R.L. Dendrochronological Program Library. Laboratory of tree-ring research. Tucson: The University of Arizona, 1983. 51 p.

**Сведения об авторе**

*Жарикова Маргарита Викторовна*, аспирант, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, once.vens@gmail.com

**Author Details**

*Margarita V. Zharikova*, Research Assistant, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia, once.vens@gmail.com

УДК 711.14.01

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-37-47

*С.В. ЛИТВИНОВ, М.М. ТИТОВА,  
Новосибирский государственный  
архитектурно-строительный университет*

## **АНАЛИЗ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ИЗУЧЕНИЮ МЕГАПОЛИСА**

В статье приводится подробный анализ известных методологических подходов к изучению возникновения, роста и предполагаемого развития мегаполисов, предложенных различными авторами. Прослежен генезис развития и усложнение различных теоретических подходов к проблеме неуправляемого роста мегаполисов. Большинство существующих градостроительных теорий, в том числе и отечественного теоретика А.Э. Гутнова, будучи феноменологическими по содержанию, не в полной мере смогли убедительно ответить на вопрос: «Почему рост мегаполисов неостановим, неуправляем и непредсказуем?» Авторами предлагается рассмотреть несколько иной подход к проблеме, основанный на канонической методологии технических наук, к которым градостроительство и принадлежит по паспорту специальности ВАК.

**Ключевые слова:** мегаполисы; методологические подходы; интеграция и агломерация; фундаментальные закономерности; собственное целеполагание.

**Для цитирования:** Литвинов С.В., Титова М.М. Анализ методологических подходов к изучению мегаполиса // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 4. С. 37–47.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-37-47

*S.V. LITVINOV, M.M. TITOVA,  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering*

## **ANALYSIS OF METHODOLOGICAL APPROACHES TO METROPOLIS STUDY**

The article presents the detailed analysis of well-known methodological approaches proposed by various authors to studying the emergence, growth and development of metropolis. The development genesis and complication of various theoretical approaches to the problem of metropolis uncontrolled growth are considered. Most of the existing urban theories, including those by A.E. Gutnov, are phenomenological and cannot give a convinced answer to the question: "Why is the megapolis growth unstoppable, uncontrollable and unpredictable?" This work proposes the different approach to the problem based on the canonical methodology of engineering, the city development, in particular.

**Keywords:** metropolis; methodological approach; integration and agglomeration; fundamental laws; desirability.

**For citation:** Litvinov S.V., Titova M.M. Analiz metodologicheskikh podkhodov k izucheniyu megapolisa [Analysis of methodological approaches to metropolis study]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 4. Pp. 37–47.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-37-47

### Введение

В настоящее время человечество подошло к такому рубежу укрупнения и слияния городов в мегаполисы, что их дальнейший неуправляемый рост приводит к последствиям, которые обнуляют все их достоинства. Так получается потому, что градостроительная мысль пока так и не дает ответа на вопрос: «Почему это происходит?» Существующие теории развития мегаполисов предлагают свои ответы, но к ним можно снова задавать этот же вопрос, а значит, ответа так и не найдено. И если обратиться к предложениям РААСН от 19.04.2019 № ВТ-02-39/269 «О приоритетных направлениях развития исследований в сфере архитектуры, градостроительства и строительных наук», то там прямо говорится о необходимости «развития основ теории города (градо-строительные проблемы мегалополисов, агломераций), о приоритете развития прикладных наук и поисковых исследований в сфере архитектуры, градостроительства, о разработке научно-методологических основ создания нового поколения нормативных и рекомендательных документов в сфере архитектуры, градостроительства, о научно-методическом обеспечении градостроительного развития Московской агломерации и других агломераций России». Возникает необходимость дать обоснованные ответы на современные и прогнозные глобальные вызовы и угрозы, затрагивающие проблемы пространственной организации Российской Федерации средствами градостроительства. И наконец, «чтобы добиться решающего сдвига в прогнозировании городского развития, по-видимому, необходимо найти новый путь, обусловленный специфическими возможностями и ограничениями современных методов научного познания, которые не имеют аналогов в традиции градостроительного проектирования» (Гутнов А.Э. Будущее науки о городе).

Первые крупные города возникли около 4 тыс. лет назад в густонаселенных сельскохозяйственных районах Месопотамии, в долине рек Нила, Инда (в западной Индии), Хуанхэ (в Северном Китае). Сам феномен возникновения города связан в первую очередь с потребностью людей в общинном образе жизни, а позже и с появлением групп населения, не связанных с сельским хозяйством, что способствовало развитию товарно-рыночных отношений как внутри общины, так и в её отношениях с соседними общинами. Согласно экономической теории, рост города связан непосредственно с переходом общества от простого воспроизводства к расширенному [1]. Развитие товарно-рыночных отношений и последующий экономический прогресс вызвал появление излишков продовольствия, возможных для обеспечения части населения, не связанного с сельским хозяйством, т. е. ремесленного, концентрирующегося на ограниченной территории. При этом местоположение поселения определялось географическими и стратегическими факторами. А. О'Салливан достаточно четко выделил факторы, способствующие росту и развитию городов: 1) межрегиональная торговля; 2) внутренний эффект масштаба производства; 3) эффект концентрации производства и маркетинга [2]. Рост крупных городов обязан научно-техническому прогрессу. Развитие энергетики (разработки технологий добычи, использования и транспортировки угля, а позднее нефти) дало мощный толчок для возникновения мануфактурного и фабрично-

го производства, что коренным образом изменило образ жизни человека. В городах стали появляться новые рабочие места, потребителю стало доступно множество новых товаров и услуг. Города не только стали местом производства товаров и услуг, но и взяли на себя новые функции по управлению и межрайонному обмену. После изобретения конвейерной системы ремесленники и крестьяне больше не могли конкурировать с фабриками и заводами, потерявшие свой доход, они хлынули в города. С 1880 по 1914 г. более 60 млн жителей Европы переселились в города из деревень. Почти в два раза выросло население Парижа за первую половину XIX в., половина населения Бельгии к 1910 г. было сосредоточено в городах [3]. Общее улучшение качества жизни и доступность товаров и услуг привели к демографическому взрыву: население Европы достигло 460 млн человек к 1914 г. [4]. Все это привело к перенаселению и ухудшению условий жизни и экологии. Хаотичный характер структуры растущих городов надо было обуздать, предотвратить распространение эпидемий и антисанитарии, избежать угрозы социального взрыва. Этой новой необходимости отвечали идеи модернизма, нашедшие отражение в идеалах функционального зонирования территории французского архитектора Ле Корбюзье и зафиксированные в Афинской Хартии СИАМ [5]. С развитием металлургии и появлением стальных конструкций города начали расти не «вширь», а «ввысь», это позволило на ограниченной территории разместить большее количество людей, обеспечивая при этом не только санитарные нормы, но и определенную степень комфорта. Следующий этап эволюции в процессе развития города можно назвать «гуманистическим». Одним из идеологов «гуманистической» концепции развития была Джейн Джекобс (1916–2006). Она была убеждена, что город нельзя строить на основе абстрактных проектов и схем, город должен слышать и понимать своих жителей, позволять им реализовывать себя, находить в городе своё место и чувствовать себя комфортно. Важен принцип саморегулирования [6]. По мнению Д. Джекобс, город должен быть благоприятной средой для развития малого и среднего бизнеса, он должен быть больше ориентирован на сферу услуг, а не на большой градообразующий завод или фабрику. В известной книге «Смерть и жизнь больших американских городов» Джекобс описывает принцип экономического функционирования городов и вводит принцип городского импортозамещения, когда ввозимые в город товары он начинает производить сам [6]. Следующая ступень эволюции – это город, который общается, который концентрирует знания и технологии и который не зависит от промышленности внутри. Пример такого города – Лондон: 91 % его ВВП приходится на сектор обслуживания [7]. Это города с развитой гражданской инициативой среди жителей, они мультикультурны, настроены на взаимодействие с другими городами и странами. В таких городах размещаются университеты, они становятся научно-культурными центрами, это места для синтеза новых знаний и технологий. Но сейчас разные города-мегаполисы стоят на разных ступенях их эволюционного развития, как анализировать этот процесс, как описать его, что при этом первично и вторично – все эти вопросы породили разнообразие теорий и подходов для описания и изучения темпов роста и вектора развития города как объекта исследования. Город становится сложной пространственной систе-

мой. Стоит подчеркнуть важную особенность ее функционирования: содержание города, его функциональное наполнение (экономика, транспорт, социально-культурная сфера и т. п.) первично – оно «порождает» форму города, его пространственную организацию. Но на определенном этапе развития системы форма становится первичной, именно она начинает определять развитие содержания, город как бы начинает «порождать самого себя», запускается процесс агломерирования. Городская агломерация (ГА) – это форма самоорганизации населения и экономических субъектов, образовавшаяся естественным, а не административным путём, возникает в результате объединения нескольких населённых пунктов или городов, объединённых в сложную многоуровневую динамическую систему, связанных экономически, производственно, транспортно и культурно [8]. Факторы формирования ГА различны и не всегда объяснимы, но в основе – стремление к экономическому и социальному эффекту за счёт снижения транспортных и ресурсных издержек, детерминированных пространством. Процесс агломерации характерен для определенного этапа урбанизации. Среди городских агломераций можно выделить:

- промышленные центры;
- промышленные узлы;
- промышленные районы;
- территориально-производственные комплексы (характерно для плановой экономики);
- кластеры (характерно для рыночной экономики).

Сам термин «агломерация» применительно к расселению был введен французским географом М. Руже. Агломерация, по Руже, возникает тогда, когда «концентрация городских видов деятельности выходит за пределы административных границ и распространяется на соседние населённые пункты» [1, 9]. В последующем, «срастаясь» между собой, агломерации образуют мегаполис. Современные ученые, например Г.М. Лаппо, видят мегаполис как сложную многокомпонентную динамическую систему, которая территориально не совпадает с ее административными границами [10]. Т.Л. Харламова отмечает, что «мегаполисы являются не только крупнейшими экономическими, но и научными центрами – в них размещены ведущие научно-исследовательские институты и университеты» [11, с. 310–314]. И.В. Федякин отождествляет мегаполис с полноправным субъектом глобальной и национальной политики [12]. П. Маршан и И. Самсон представляют мегаполисы в качестве центров: масштабного материального производства, притяжения людей, информации, товаров и услуг [13]. Формально на сегодняшний день к мегаполисам принято относить город или городскую агломерацию с населением более 1 млн человек [14].

Отличительной чертой мегаполиса от агломерации является тот факт, что мегаполис – это не просто сложная система концентрации людей, промышленности, науки, но и город, возникший в результате эволюции под воздействием определенных факторов, таких как внедрение инноваций; диверсификация деятельности; выгодное с экономической и политической точки зрения географическое положение; инвестиции и поддержка предпринимательства. Также существует прямо пропорциональная связь между размером



города и объемом предоставляемых услуг: чем крупнее город, тем больше его социально-экономическое, экологическое, политическое, культурное значение, тем требуется большая развитость спектра услуг; в мегаполисе уровень инновационной активности выше, чем в небольших городах, за счет концентрации на своей территории ведущих вузов, работы технопарков и научных центров. Концентрация в мегаполисах ведущих ученых и специалистов различных сфер деятельности объясняется наличием для них рабочих мест, благоприятными условиями труда, сравнительно высоким уровнем жизни. Создание инновационной продукции ведет к толчку в экономическом развитии региона и страны, что, как следствие, приводит к росту конкурентоспособности, занятости и доходов.

Однако рост мегаполиса возможен лишь до определенного момента, по мере увеличения физических размеров города функциональная и транспортная перегрузка его главных центров начинает создавать ощутимые неудобства в реализации насущных потребностей населения. Нарращивание функций перестает быть эффективным. Темпы роста замедляются. Наиболее эффективным с точки зрения задач полноценного функционирования системы становятся затраты на трансформацию и перестройку этой системы. Режим расходования энергетических ресурсов развития системы радикально меняется. По мнению советского архитектора, теоретика архитектуры и градостроительства А.Э. Гутнова (1937–1986), этот процесс описывает колебательный цикл – универсальный механизм развития градостроительной системы, представляющий форму взаимозависимости ее количественных и качественных изменений. Один полный колебательный цикл включает две фазы: роста и структурной реорганизации. Целью будущих исследований может являться выявление закономерностей формирования мегаполисов, определение перспектив их развития и более подробное изучение процесса колебательного цикла в его жизни; градостроительную науку, в частности, интересуют закономерности пространственного развития мегаполиса и принципов его оптимизации [15].

В процессе изучения города градостроительной наукой были разработаны различные методологические подходы. Методология архитектурно-градостроительной науки определяется как система принципов и способов организации и построения теоретической и практической действительности формирования городского пространства. Так, при рассмотрении градостроительной системы с *позиции структурно-функционального подхода* предметом исследования явились принципы и закономерности формирования структурно-функциональной организации данной градостроительной системы (города или мегаполиса). *Пространственный же подход* предполагает пространственное видение объекта исследования, фиксацию его свойств и характеристик в пространственном выражении. В теории архитектуры и градостроительства выделяют *морфологические, символические и феноменологические* представления о пространстве. Морфологическое описание пространства – основная форма естественно-научного и математического представления – оперирует преимущественно количественными категориями и дает точное и однозначное, независимое от субъективных оценок и условий восприятия знание [16]. Элементарными примерами морфологического описания является дежурный план города на

топографической основе в конкретном масштабе или описание города в ГИС-системе. Символическое описание имеет значение только в контексте той или иной культуры, оно характеризует значение пространственной формы. Один и тот же с морфологической точки зрения объект в разных культурах может нести разный смысловой и символический посыл. Символическое описание пространственных форм мегаполиса вряд ли возможно, т. к., во-первых, сам по себе феномен мегаполиса одновременно и следствие, и причина процессов глобализации, а последняя, как известно, стирает культурные границы, а во-вторых, культурная идентификация возможна только в более локальных пространствах. Феноменологическое описание в большей степени связано с субъективными условиями восприятия или оценки пространства. Значения феноменологических характеристик («величественное», «уютное», «подавляющее» и т. п.) не имеют установившихся объективных обозначений и не поддаются измерению. Мегаполис не воспринимается одномоментно, поэтому какая-нибудь феноменологическая характеристика (редукция) по отношению к нему может возникнуть только при более или менее длительном в нем пребывании. Редукция также может возникнуть только в сравнении, поэтому феноменологические описания возможны после исследования восприятия нескольких мегаполисов; кроме того, они возможны как сумма субъективных оценок репрезентативной социологической выборки людей (жителей), которые одновременно должны оценить несколько мегаполисов, а значит, иметь опыт жизни в них. Поэтому научные феноменологические описания мегаполиса вряд ли возможны. *Функциональный подход* в градостроительстве восходит к идеям Ле Корбюзье, Р. Мозеса и других архитекторов, устанавливающих приоритет системы проектирования и зонирования городского пространства над нормами общественного восприятия. Функциональный подход ориентирован на разработку универсальных правил и приемов, позволяющих переносить опыт их реализации с одной территории на другую, и развитие методик функционального зонирования территории, дающих представление о четкой и последовательной дифференциации во времени и пространстве всех основных процессов, протекающих в городе, – труда, быта, отдыха. Однако опыт градостроительной практики 1960–70-х гг. показывает, что реальный процесс функционирования развивающихся городов не укладывается в жесткие рамки функционализма. Город – живая структура, и в столь жестких рамках со временем начинается процесс стагнации, новое время создает запрос на новые функции и сценарии жизни в городе, которые невозможно обеспечить, используя только функциональный подход. Занимательно, но критикой функционализма занимались в основном не архитекторы, а люди – простые жители города, на удовлетворение нужд которых и были направлены усилия функционалистов. Отбросив эмоциональную составляющую, можно выделить два основных момента, подвергшихся критике:

– уход от человеческого масштаба, новые жилые районы, промышленные и общественные комплексы полностью игнорировали человеческий масштаб и соразмерность, они выглядели гигантами, создающими подавляющее впечатление;

– монотонность и однообразие окружающей среды. Для облегчения процесса производства и, следовательно, удешевления продукции и доступности выпускаемой продукции и благ все вокруг подлежало унификации и стандартизации. Это порождало формальное отношение к человеку как к абстрактному потребителю архитектуры.

В свете таких критических установок многие архитекторы и исследователи города стали сосредотачивать свое внимание на изучении взаимосвязи между поведением горожанина и характеристиками городского пространства. К. Линч, например, обосновывает необходимость создания в городе «пространства неиспользуемых возможностей», которые могли бы послужить определенным резервом адаптации к жестко запрограммированному типу городского окружения [17]. Подобной проблематике посвящен также ряд работ советских архитекторов (А.В. Иконников, Г.З. Каганов и др.). Их исследования, рассматривающие город как единое целое, включая в него человека с его реальными потребностями и особенностями психологии, послужили фундаментом для социального подхода.

*Социальный подход* исходит из необходимости сознательного конструирования городской среды посредством активного участия граждан в проектировании и освоении среды обитания. Основоположником социального направления в градостроительстве можно считать Патрика Геддеса (1854–1932). Геддес опирался на круговую теорию географических локаций, представляющую экологические ограничения и возможности, которые, в свою очередь, определяют характер труда. Его центральный аргумент состоял в том, что физическая география тесно связана с рыночной экономикой и антропологией, обеспечивая согласование общественной жизни на базе их комбинирования. Таким образом, по мнению П. Геддеса, цель градостроителя заключается в налаживании взаимодействия человека с окружающей его средой. Активное участие граждан в определении параметров городской среды стало исходным принципом уже упомянутой Джейн Джекобс. Она выступала против планирования города, основанного на абстрактных идеях, игнорирующих мнения горожан, их восприятие происходящих с городской средой процессов. Джекобс сформулировала ряд правил, которые необходимо соблюдать для соответствия городской планировки общественным ожиданиям, к ним можно отнести: «наличие функциональной идентичности, самобытности территории, ее культурно-исторического контекста; дробность кварталов; широкое использование публичных объектов в качестве составных элементов уличной ткани; концентрацию в районе зданий разного возраста и состояния и пр.» [6, с. 183]. Ключевую роль в развитии социального направления в градостроительстве сыграл также американский исследователь в области городского планирования Кевин Линч (1918–1984). Линч выделил пять основополагающих элементов образа города, при помощи которых горожане воспринимают его, представляя свое окружение в качестве ментальной карты, отображающей воспринимаемое пространство: пути, границы, районы, узлы, ориентиры. В своих исследованиях Линч подчеркивал тот факт, что изменения физического окружения делают необходимой адаптацию к ним человека, а такая адаптация возможна только при наличии относительно устойчивых во

времени элементов окружения, которые играют роль своеобразных точек отсчета, якорей. «Мы благополучно справляемся с изменениями, – говорит К. Линч, – только тогда, когда мы можем одновременно сохранить какую-то частичную неразрывность с прошлым, будь то люди, вещи, места» [18, с. 83]. На уровне городского окружения, считает Линч, это могут быть сложившиеся центры, улицы, ориентиры или топографические места. Такого же мнения придерживался известный советский архитектор и градостроитель В.А. Лавров (1896–1967), по его мнению, город должен сочетать «относительно длительно действующие устойчивые части» и «элементы, подверженные быстрым изменениям» [19, с. 8]. Таким образом, город предстает перед нами как процесс, протекающий в определенной пространственной среде, а не как среда, взятая сама по себе, инертная к протекающим в ней процессам. Эта «социализация» города как объекта проектирования и исследования составляет главную отличительную особенность современного этапа эволюции градостроительного мышления. Она все более отчетливо осознается проницательными исследователями города и не может не сказаться на практической деятельности градостроителей.

Социальный подход может быть включен в *системный подход*. Если решение частных технических задач, разработка малых систем ведут, как правило, к дифференциации знания, к растущей специализации исследований, то разработка больших систем, наоборот, предполагает интеграцию, синтез знания. При изучении развития города следует использовать подход, который учитывает те явления, которые системным подходом рассматриваются как несущественные или второстепенные, а именно: случайность связей, непостоянство отношений, кратковременность их существования, стихийность и т. п. Это связано, в частности, с тем, что городская общность неоднородна, что она складывается из множества индивидов и отдельных социальных групп. «Наиболее характерной чертой городской среды, – считает В.М. Розин, – является ее нарастающее разнообразие. Горожанин вовлекается в многообразные формы общения: в семье, на работе, в общественных и публичных местах, в учреждениях, среди друзей или в группах по интересам, на транспорте, в толпе, на прогулке и т. д. В каждой из этих сфер складывается свой кодекс требований, свои стандарты поведения. При этом каждая из образующихся в общении социальных групп может в принципе ничего не знать о других, и групповые нормы поведения одной общности, как правило, не распространяются на другие общности» [20, с. 621]. Город – это сложный организм, в котором заполнение пространства происходит за счет хаотичных включений элементов в многомерной среде. В связи с этим возникает необходимость в разработке градостроительных методов, позволяющих рационально использовать территории под застройку с учетом всех влияющих на нее факторов, прогнозировать дальнейшее развитие урбанизированной структуры и внедрение в нее новых архитектурно-градостроительных форм. На данный момент прослеживается тенденция ориентирования многих научных работ, посвященных вопросам архитектуры и градостроительства, на поиск новых методов решения теоретических задач, анализа и регулирования развития городской среды, для чего привлекаются смежные науки и проводятся междисци-

плинарные исследования [21]. Градостроительство является прямым доказательством возможности интеграции, охватывает вопросы проектирования, создания, испытания и эксплуатации сложных систем. При этом системный подход наряду с моделированием составляет методологическую основу градостроительства. Ведь по существу современный мегаполис в терминах общей теории систем есть сверхсистема, которая по определению может иметь собственное целеполагание, не осознаваемое и не наблюдаемое сторонним взглядом. Нам представляется, что любое простое феноменологическое описание изменения во времени и построение на этой основе каких-либо теорий функционирования объекта исследования – мегаполиса – на сегодняшний день не дают ответа на главный вопрос методологии объекта изучения – почему мегаполисы растут, несмотря на все управленческие и научные усилия, и к чему это может привести в будущем. Ответы, которые эти теории дают, можно в первом приближении принять, но, по большому счету, к каждому из этих ответов можно еще задать вопрос «почему?» и к каждому новому ответу новое «почему?» В технических науках (в градостроительстве в том числе) это верный признак того, что ответ неправильный или, по крайней мере, неполный. И только ответ, к которому нельзя уже задать вопрос «почему?», будет исчерпывающим. Но это только в том случае, если ответ будет дан формулировкой фундаментального закона. Ведь в этом мире не происходит ничего, кроме реализации фундаментальных законов природы, и это утверждение не требует доказательств, т. к. ничто не происходит вопреки им.

### Заключение

Таким образом, можно предположить, что с применением комплексного подхода (широкий спектр когнитивных методов, таких как общая теория систем, теория катастроф, синергетика, классические методы технических наук, анализ статистических и GIS-данных) возможно установление фундаментальных закономерностей роста мегаполисов и только на этой основе разработка научно обоснованной методологии градостроительного прогнозирования и выявления факторов и причин неостановимого роста мегаполисов, а полученные результаты, в свою очередь, могут быть применимы для будущей корректировки генеральных планов городов и уточнения вектора их дальнейшего позитивного развития.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шумпетер Й.А. Теория экономического развития. Капитализм, социализм и демократия. Москва, 2007.
2. О'Салливан А. Экономика города / пер. с англ. В.П. Пипейкина. Москва : Инфра-М, 2002. 705 с.
3. Ливи Баччи Массимо. Численное выражение демографической экспансии и её интерпретации / пер. с итал. А. Мирюлюбовой // Демографическая история Европы. Серия «Становление Европы». Санкт-Петербург : Александрия, 2010. 304 с.
4. 1920/1950 гг.: United Nations, Demographic Yearbook 1955. New York, 1955.
5. Ле Корбюзье. Афинская Хартия. URL: <http://tehne.com/node/4613>
6. Джейн Джекобс. Смерть и жизнь больших американских городов / пер. с англ. Л. Мотылев. Москва : Новое издательство, 2019. С. 183, 327–465.

7. *Five facts about The UK service*. URL: <https://www.ons.gov.uk/economy/economic-outputandproductivity/output/articles/fivefactsabouttheukservicesector/2016-09-29>
8. Петров Н.В. Городские агломерации: состав, подходы к делимитации // Проблемы территориальной организации пространства и расселения в урбанизированных районах. Свердловск, 1988. С. 15–16.
9. Лаппо Г., Полян П., Селиванова Т. Агломерации России в XXI веке. Городские агломерации России // Демоскоп Weekly. 2010. № 407–408.
10. *Население и общество*. Институт демографии Государственного университета – Высшей школы экономики : электронная версия бюллетеня. URL: <http://polit.ru/article/2010/02/16/demoscope407/>
11. Лаппо Г.М. География городов. Москва : ВЛАДОС, 1997. С. 18–20.
12. Харламова Т.Л. Совершенствование процесса управления инновационным развитием мегаполиса // Проблемы современной экономики. 2012. № 1. С. 310–314.
13. Федякин И.В. Мегаполисы как субъекты политики: история и современность // Обозреватель – Observer. 2013. № 8 (283). С. 48–56.
14. Маршан П., Самсон И. Метрополисы и экономическое развитие России // Вопросы экономики. 2004. № 1. С. 4–8.
15. *Городская агломерация* // Википедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Городская\\_агломерация](https://ru.wikipedia.org/wiki/Городская_агломерация)
16. Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. Москва : Стройиздат, 1984. С. 132–133.
17. *Концепции архитектурного пространства*. Центр научно-технической информации (ЦНТИ) Госкомархитектуры. Обзорная информация. Серия 1. «Теория и история архитектуры». Вып. 1. Москва, 1988.
18. Линч К. Образ города / пер. с англ. В.Л. Глазычева ; под ред. А.В. Иконникова. Москва : Стройиздат, 1982. С. 24, 83.
19. Лавров В.А. Реконструкция крупных городов. Москва, 1972. С. 8.
20. Розин В.М. Городская культура, человек, окружающая среда (Философско-методологические проблемы градостроительного проектирования) // Вопросы философии. 1980. № 1. С. 50–65.
21. *Человек в мегаполисе* (Опыт междисциплинарного исследования) / под ред. Б.А. Ревича, О.В. Кузнецовой // URSS. Москва, 2019. 621 с.

#### REFERENCES

1. Schumpeter J.A. Teorija jekonomicheskogo razvitija [Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung]. Kapitalizm, socializm i demokratija [Kapitalismus, Sozialismus und Demokratie]. Moscow, 2007. (transl. from Germ.)
2. O'Sullivan A. Jekonomika goroda [Urban economics]. Moscow: Infra-M, 2002. 705 p. (transl. from Engl.)
3. Massimo Livi Bacci. Demograficheskaja istorija Evropy. Serija "Stanovlenie Evropy" [An essay on European demographic history]. Saint-Petersburg: Aleksandriya, 2010. 304 p. (transl. from It.)
4. 1920/1950: United Nations, Demographic Yearbook 1955, New York, 1955.
5. Le Corbusier. Afinskaja Hartija [The Athens Charter]. Available: <http://tehne.com/node/4613> (rus)
6. Jacobs J. Smert' i zhizn' bol'shih amerikanskih gorodov [The death and life of great American cities]. Moscow: Novoe Izdatel'stvo, 2019. Pp. 183, 327–465. (transl. from Engl.)
7. Five facts about the UK service. Available: [www.ons.gov.uk/economy/economic-outputandproductivity/output/articles/fivefactsabouttheukservicesector/2016-09-29](https://www.ons.gov.uk/economy/economic-outputandproductivity/output/articles/fivefactsabouttheukservicesector/2016-09-29)
8. Petrov N.V. Gorodskie aglomeracii: sostav, podhody k delimitacii [Urban agglomerations: composition, approaches to delimitation]. In: Problemy territorial'noj organizacii prostranstva i rasselenija v urbanizirovannyh rajonah [Problems of territorial organization of space and settlement in urbanized areas]. Sverdlovsk, 1988. Pp. 15–16. (rus)
9. Lappo G., Polyani P., Selivanova T. Aglomeratsii Rossii v XX veke [Agglomerations of Russia in the 20th century]. Demoskop Weekly. 2010. No. 407–408. (rus)

10. Naselenie i obshchestvo Institut demografii Gosudarstvennogo universiteta - Vysshej shkoly jekonomiki [Population and society. Institute of Demography of the State University Higher School of Economics]. Available: <http://polit.ru/article/2010/02/16/demoscope407/> (rus)
11. Lappo G.M. Geografija gorodov [Geography of cities]. Moscow: VLADOS, 1997. Pp. 18–20. (rus)
12. Harlamova T.L. Sovershenstvovanie processa upravlenija innovacionnym razvitiem megapolisa [Improvement of innovation development management in metropolis]. *Problemy sovremennoj ekonomiki*. 2012. No. 1. Pp. 310–314. (rus)
13. Fedjakin I.V. Megapolisy kak sub'ekty politiki: istorija i sovremennost' [Metropolis as a subject of politics: history and modernity]. *Obozrevatel'*. 2013. No. 8 (283). Pp. 48–56. (rus)
14. Marchand Ph., Samson I. Metropolisy i jekonomicheskoe razvitie Rossii [Metropolises and Russia's economic development]. *Voprosy ekonomiki*. 2004. No. 1. Pp. 4–8. (rus)
15. Gorodskaja aglomeratsiya [City agglomeration]. Available: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Gorodskaja\\_aglomeracija](https://ru.wikipedia.org/wiki/Gorodskaja_aglomeracija) (rus)
16. Gutnov A.E. Evoljucija gradostroitel'stva [Evolution of city development]. Moscow: Stroiizdat, 1984. Pp. 132–133. (rus)
17. Kontseptsii arkhitekturnogo prostranstva. Tsentr nauchno-tehnicheskoi informatsii (TsNTI) Goskomarkhitektury. Obzornaya informatsiya. Seriya 1. «Teoriya i istoriya arkhitektury» [Concepts of architectural space. Center for Scientific and Technical Information of the State Committee for Architecture and Construction. Overview information. Series 1. "Theory and History of Architecture"], issue 1. Moscow, 1988. (rus)
18. Lynch K. Obraz goroda [The image of the city]. A.V. Ikonnikov, Ed., Moscow: Stroiizdat, 1982. Pp. 24, 83. (transl. from Engl.)
19. Lavrov V.A. Rekonstrukcija krupnyh gorodov [Reconstruction of large cities]. Moscow, 1972. P. 8. (rus)
20. Rozin V.M. Gorodskaja kul'tura, chelovek, okruzhajushhaja sreda (Filosofsko-metodologicheskie problemy gradostroitel'nogo proektirovanija) [Urban culture, man, environment (Philosophical and methodological problems of urban planning)]. *Voprosy filosofii*. 1980. No. 1. Pp. 50–65. (rus)
21. Revich B.A., Kuznetsova O.V. (Eds.), Chelovek v megapolise (Opyt mezhdisciplinarnogo issledovaniya) [The man in a metropolis (Experience of interdisciplinary research)]. Moscow, 2019. 621 p. (rus)

#### Сведения об авторах

Литвинов Сергей Викторович, канд. архитектуры, доцент, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, svl\_1978@mail.ru

Титова Мария Михайловна, аспирант, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, maria\_tmm@bk.ru

#### Authors Details

Sergey V. Litvinov, PhD, A/Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, svl\_1978@mail.ru

Maria M. Titova, Research Assistant, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, maria\_tmm@bk.ru

УДК 002.304

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-48-72

*И.И. КОЛОСОВА, Д.А. ВАДЯЕВА,  
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

### **ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ, СТАНОВЛЕНИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕРЕВА В АРХИТЕКТУРЕ СТРАН ДРЕВНЕГО МИРА ДО Н. Э.**

Использование естественных форм в архитектуре прослеживается на протяжении всей истории человечества. Одной из первых естественных форм, которую человек инстинктивно применил в строительстве, является дерево. Дерево дало конструктивную основу первым сооружениям древнего человека. Но позже люди наделили его ещё и духовной значимостью и стали повторять образ дерева в различных материалах (камень, бетон, дерево).

Перед авторами стояла цель: провести анализ происхождения и алгоритм обновления формы основного строительного элемента – колонны на основе изучения развития архитектуры стран Древнего мира. Основной вопрос изучения этих конструкций заключается в отслеживании взаимосвязи таких важных критериев архитектурных элементов и зданий в целом, как техника (конструктив) и эстетика. Основным результатом исследования является прослеженная эволюция дизайна колонн как логическое следствие понимания внутренних отношений между формами и структурами в деревьях и растениях и как эффект от достижений в конструкционных, теоретических, графических, технологических и вычислительных знаниях в разные периоды времени. В заключение отметим, что за 4 тыс. лет конструкция колонны прошла путь от использования природного дерева до совершенной стоечно-балочной системы, повсеместно используемой в строительстве. Хотя она и претерпела ряд изменений с течением времени, она все так же является прототипом своего прообраза – дерева, что наглядно видно по приведенным примерам зданий и сооружений разных стран и в разные временные промежутки. Можно предположить, что дальнейшее развитие архитектуры определяет возвращение строительства и его конструктивных составляющих в мир природного формообразования со всем его богатством и уникальностью каждого объекта.

**Ключевые слова:** жилище; храмы; строительные конструкции; колонна; стоечно-балочная система; формообразование; прообраз; дерево; типовое проектирование.

**Для цитирования:** Колосова И.И., Вадяева Д.А. Этапы развития, становления и совершенствования конструктивных особенностей дерева в архитектуре стран Древнего мира до н. э. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 4. С. 48–72.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-48-72

*I.I. KOLOSOVA, D.A. VADYAEVA,  
Tomsk State University of Architecture and Building*

### **DEVELOPMENT, FORMATION AND IMPROVEMENT OF WOOD CONSTRUCTIONAL PROPERTIES IN ANCIENT ARCHITECTURE BC**

The use of natural forms in architecture can be traced throughout the history of mankind. Wood is one of the first natural forms applied in construction. Wood was the basis for the first



structures in ancient world. Later, people gave it spiritual significance and began to repeat a tree image using various materials (stone, concrete, wood).

The aim of this work is to analyze the origin and algorithm of updating the main building element, a column, studying the architecture of the ancient world. It is important to study the relationship between such important criteria of architectural elements and buildings as techniques and aesthetics. The findings include the evolution of column design as a logical consequence of understanding the relations between forms and structures of trees and plants, and knowledge in structure, theory, graphics, technology and computation in different time periods. During 4,000 years, the column design passed from using natural wood to post-and-lintel construction, that is widely used nowadays. After a number of changes, it is still the wood prototype, which is clearly seen in buildings in different countries and time periods. It can be assumed that further development of architecture determines the construction return to the natural form making with the richness and uniqueness of each object.

**Keywords:** house; temple; building; column; post-and-lintel construction; form making; prototype; tree; standard design.

**For citation:** Kolosova I.I., Vadyaeva D.A. Etapy razvitiya, stanovleniya i sovershenstvovaniya konstruktivnykh osobennostei dereva v arkhitekture stran drevnego mira do n. e. [Development, formation and improvement of wood constructional properties in ancient architecture BC]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 4. Pp. 48–72.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-48-72

На всем протяжении развития человечества на планете Земля одним из важных критериев его выживания стало наличие убежища. Еще на первых этапах истории в эпоху раннего палеолита первобытный человек искал возможность защищаться от непогоды и прятаться от диких зверей. В зависимости от региона проживания он то скрывался в скальных пещерах, то искал пристанище под раскидистыми корнями и кронами могучих деревьев (рис. 1). При этом в местности, где климат был более теплым, ночлегом служили ямы, рвы и настилы из листьев [1]. Каждый из перечисленных видов «домов» имел природное происхождение. Только значительно позже, когда появились первые примитивные орудия труда и способы использования их в практике выживания, человек осознал необходимость постоянной «крыши над головой». И одним из первых природных объектов, который стал для древнего человека основой будущего строительства жилья, стал ствол дерева.

Первое рукотворное укрытие древнего человека представляло собой навес, выполненный из опирающихся на скалы или деревья веток и крупных листьев.

Позже наиболее распространенной стала конструкция, состоявшая из двух близко растущих деревьев, на сучья которых укладывался ствол. На него опирались ветки или листья. Получался навес, каркас которого был выполнен по подобию вертела над костром (рис. 2). Именно с целью спрятать костер от порывистого ветра изначально и был сооружен навес.

Следующим этапом стало сооружение отдельно стоящих, расположенных самостоятельно, без привязки к существующим деревьям, жилищ. Древние люди вбивали два ствола сломленных бурей деревьев в землю, а на их разветвления в верхней части укладывали третий ствол, затем на эту кон-

струкцию, выполнявшую роль каркаса, опирали ветви или растягивали шкуры, создавая первобытные шалаши. Это было первое самостоятельно разработанное и конструктивно апробированное сооружение (рис. 3).

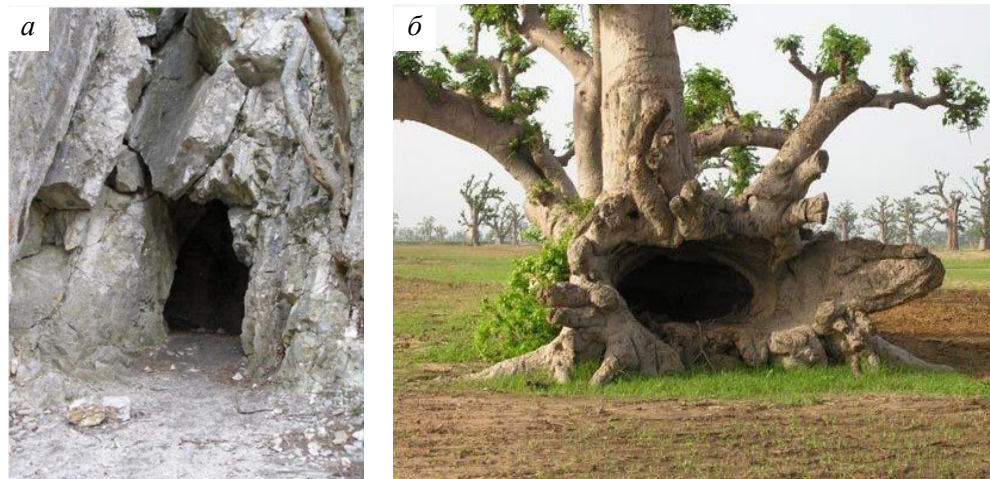


Рис. 1. Первые пристанища первобытного человека (URL: <https://infourok.ru/prezentaciya-k-masterskoy-baobab-3864446.html>):  
а – пещера; б – корни крупных деревьев



Рис. 2. Первая постройка примитивного жилища древнего человека (URL: <https://picki-mage.ru/detskie-risunki/school/history/pervobytnyj-chelovek/>):  
а – ветровой заслон; б – каркас ветрового заслона; в – вертел над костром, как прообраз каркаса шалашей первобытных людей

Используемая конструкция была примитивна и недолговечна за счет своей неустойчивости. Практически любой порыв ветра мог не только сорвать непрочную крышу-стену, но и полностью разрушить шалаш, лишая человека его единственного убежища. В поисках защиты своего жилища от разрушения человек пришел к выводу, что если на крышу сооружения положить несколько тяжелых камней, а стволы деревьев вбить в землю на более значительную глубину, то вся постройка будет гораздо прочнее. А если «переплести» вершины веток, составляющих основу объекта, то он станет еще более устойчивым и долговечным. В процессе эксплуатации было определено, что в тех местах, где земля была «слабой» или местность болотистой, тяжелая крыша оказывала сильное давление на поддерживающие ее стволы-опоры, что

приводило к тому, что весь шалаш оседал. В результате человек начал устанавливать стволы на более твердое основание, которым стали выложенные по периметру сооружения камни. С тем чтобы стволы не ломались и не прогибались под тяжестью крыши, древний человек увеличил количество опор (стволов) и еще более глубоко вбил их в землю. Кроме того, стык между боковыми ветками и поверхностью земли был также усилен расположенными по периметру камнями. Они не позволяли «стенам дома» разъезжаться. Это был значительный шаг вперед в первобытном строительстве.

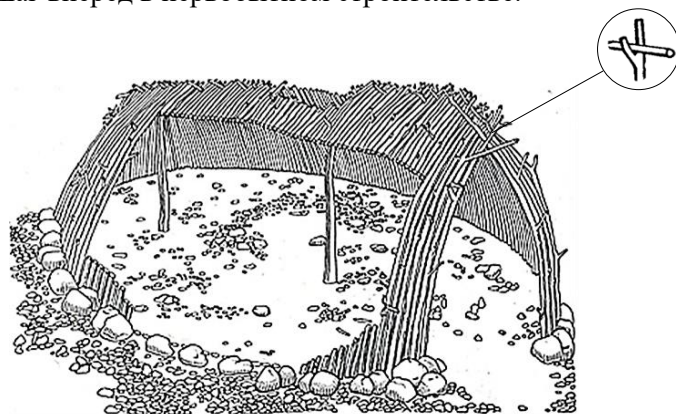


Рис. 3. Шалаш из Терра Амата (юг Франции у Ниццы), 230 тыс. лет до н. э. Рисунок И.И. Колосовой

Используя достоинства, присущие стволам деревьев, человек эмпирическим путем конструировал все более совершенную опору для крыши своего жилища. Она становилась не только выше, значительнее в диаметре, но и подбиралась с большим количеством сучков-развилочек. Это позволило «распределить» нагрузку по дополнительным «вертелам» и обеспечить опирание «стен» в нескольких местах (рис. 4). Так родился основной конструктивный элемент – колонна (рис. 5).



Рис. 4. Усовершенствованное наземное жилище первобытного человека, выполненное с использованием более сложного деревянного каркаса (URL: <https://zen.yandex.ru/media/id/5a755bf4c89010f00ed91cab/istoriia-karkasnoi-tehnologii-stroitelstva-5b4c49c82e3a8e00a849c3dc>)

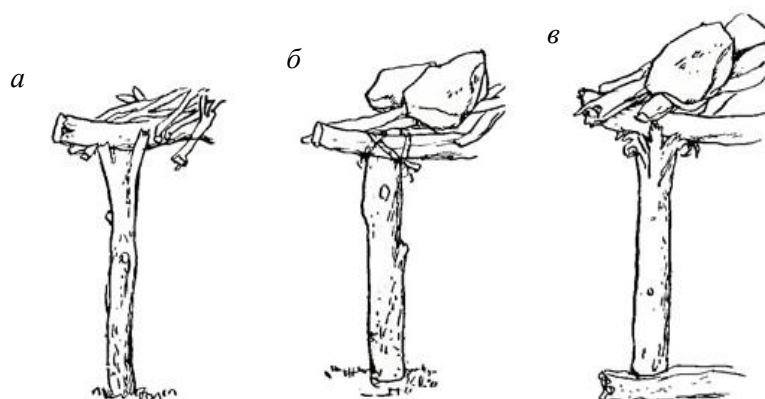


Рис. 5. Этапы развития первобытной колонны. Рисунок И.И. Колосовой:

*а* — вертикальная опора из обрубленного дерева с существующей корневой системой, используемая в конструкциях первых сооружений — ветровых заслонах, 300 тыс. лет до н. э.; *б* — вбитая в землю вертикальная опора (ствол дерева) в шалашах, 230 тыс. лет до н. э.; *в* — вертикальная опора, установленная на основу из камней, в шалашах, построенных на болотистой местности, 220 тыс. лет до н. э.

В странах, где шалаш плохо защищал от холода, под ним стали рыть землянки (эпоха неолита III—I тыс. до н. э.).

Конструкция землянки — все та же стоечно-балочная система (рис. 6). Кровля землянок выполнялась двускатной. Настил из бревен и поперечных лаг прокладывался хворостом, тростником или дерном, утрамбовывался глиной и засыпался толстым слоем земли. Под опору подкладывали камень, чтобы ствол не просел.

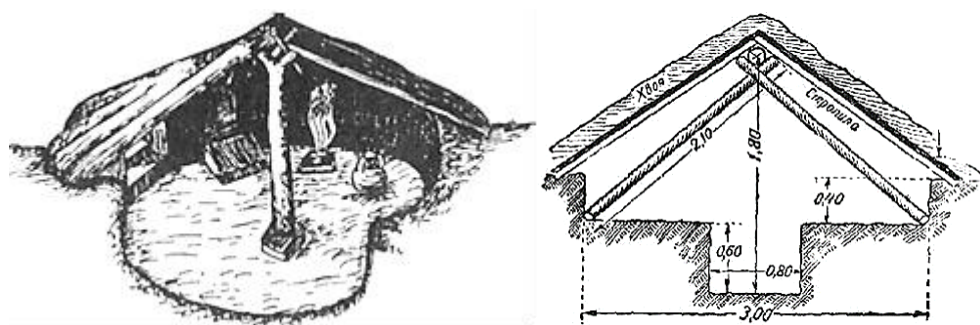


Рис. 6. Землянка древнего человека, III—I тыс. до н. э. (URL: <http://www.sno.pro1.ru/lib/skrzhinskaya/original/olvia-16.html>)

В странах, где шалаш плохо защищал от холода, под ним стали рыть землянки (эпоха неолита III—I тыс. до н. э.).

Конструкция землянки — все та же стоечно-балочная система (рис. 6). Кровля землянок выполнялась двускатной. Настил из бревен и поперечных лаг прокладывался хворостом, тростником или дерном, утрамбовывался гли-



ной и засыпался толстым слоем земли. Под опору подкладывали камень, чтобы ствол не просел.

В районах с суровым климатом сооружали другой вид жилища – чум. Его конструкция немного отличается от стоечно-балочной системы и представляет собой конусообразный каркас из веток. Ветки связывались в один общий пучок под углом и расправлялись во все стороны, подобно веткам кроны дерева (рис. 7). В отдельных случаях каркас усиливался костями мамонта. Зазоры между костями заполнялись мхом и ветками кустарников. Затем вся конструкция покрывалась дёрном и обтягивалась шкурами животных.

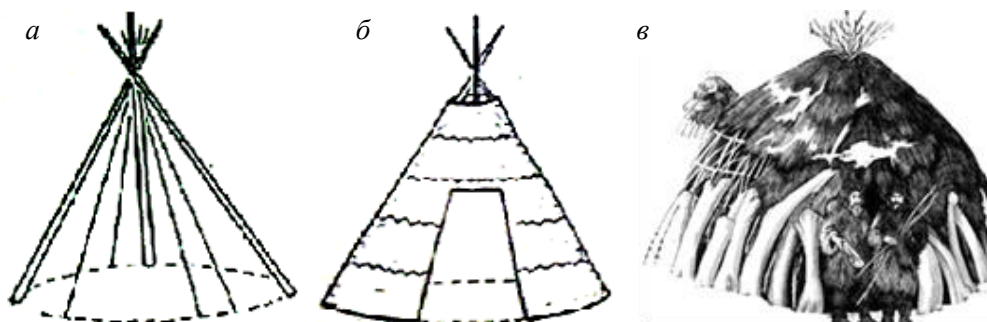


Рис. 7. Разновидности чумов древнего человека (URL: [http://miristorii.ru/index/1\\_1\\_formirovanie\\_i\\_razvitie\\_pervobytnogo\\_stroja\\_na\\_territorii\\_ukrainy/0-13/](http://miristorii.ru/index/1_1_formirovanie_i_razvitie_pervobytnogo_stroja_na_territorii_ukrainy/0-13/)):

*а* – деревянный каркас чума; *б* – чум, обтянутый шкурой животных; *в* – чум, усиленный костями мамонта и покрытый шкурами животных

Кроме перечисленных жилищ активно возводили свайные постройки. Здания, опирающиеся на деревянные сваи, располагались на берегах озер и водно-болотных угодьях. Конструкция таких домов – усовершенствованная стоечно-балочная система, остов здания основательный. Жилища были построены в период с 5000 до 500 г. до н. э. (рис. 8).



Рис. 8. Дома на сваях, Альпы: (URL: <https://yandex.com/collections/card/5baa18da467d08008f1023fa/>)

Таким образом, анализируя жилища людей эпохи палеолита, их можно разделить на три основных типа: простейшие природные убежища разных видов, первые примитивные шалашеобразные конструкции и жилища, рассчитанные на длительный период использования с жестким каркасом – остоном, основанием в виде камней и стенами-заслонами.

Главным достижением этой эпохи стало появление колонны как одного из самых важных базовых конструктивных элементов. Всё последующее развитие архитектуры было определено многочисленными факторами, основные из которых: климатические условия, этнические особенности того или иного народа, местные ресурсы для строительства и т. п.

В эпоху бронзового века (5–1 тыс. до н. э.) появились металлические орудия труда, которые позволили использовать в строительстве новый материал – камень. Наиболее древними и известными каменными постройками являются сооружения, сложенные из крупных каменных глыб или плит с использованием вертикальных опор. Они получили название мегалитические (от греческого мегас – большой, литос – камень) [2]. К их числу принадлежат: менгиры<sup>1</sup>, дольмены<sup>2</sup> и кромлехи<sup>3</sup> (рис. 9). Назначение этих сооружений, в отличие от ранее описанных, было связано, главным образом, с религией, погребальными обрядами и знаковыми событиями. При этом главным источником творческого вдохновения в поиске новых конструктивных возможностей при строительстве по-прежнему оставались образы деревьев и леса, покрывавшего тогда почти всю планету. Более того, таинственные, величественные, устремленные в небо, к свету деревья были для древнего человека главным связующим между ним и Богом. А основной несущий элемент конструктивной системы (вертикальная опора) становился, таким образом, «говорящим» символом, связывающим три мира: подземный, земной и небесный.



Рис. 9. Мегалитические сооружения (URL: <https://zhitanska.com/content/megality-izumrudnogo-ostrova-irlandiyi/>):

а – самый высокий менгир во Франции Шам-Долен; б – дольмен Пулнаброн в Ирландии, около 4000 г. до н. э.; в – кромлех Стоунхендж (Англия), между 3500 и 2000 гг. до н. э.

<sup>1</sup> Менгиры – это одиночные большие каменные глыбы, врытые своей нижней частью в землю в виде столба. Предполагают, что менгиры располагали в местах, где были захоронения наиболее влиятельных и известных людей – родоначальников или вождей племен.

<sup>2</sup> Дольмен – культовое сооружение, состоящее из двух вертикально поставленных камней, на которые водружен третий горизонтальный камень [2].

<sup>3</sup> Кромлех – сооружение, служившее для жертвоприношений и ритуальных торжеств [2]. Состоял из огромных отдельно стоящих камней – вертикальных опор, которые накрывались горизонтальными камнями – балками и образовывали в плане одну или несколько концентрических окружностей.

Можно с уверенностью предположить, что именно эти сооружения получили дальнейшее развитие в египетских и греческих каменных колоннах.

Анализ развития архитектуры Древнего Египта показал, что наиболее значительные изменения в типологии, конструктивных особенностях и форме коснулись в первую очередь вертикальных опор – столбов и колонн. На ранних этапах строительства наиболее часто применяли опоры, имевшие в плане геометрически правильные формы. Такие опоры представляли собой массивные столбы квадратного в плане сечения, иногда покрытые рельефами (рис. 10). С развитием и совершенствованием орудий труда и потребностью строить значительные по площади сооружения в период Нового царства (1500–1100 гг. до н. э.) стали использовать более сложные колонны, формы которых подражали образам из растительного мира [3].

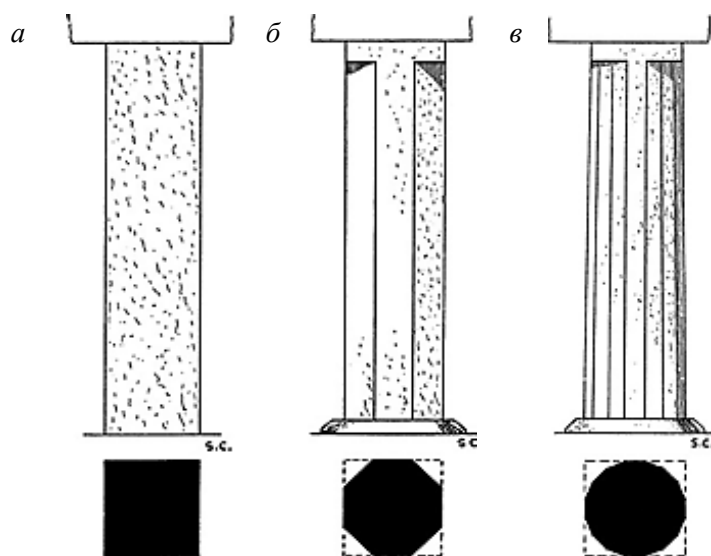


Рис. 10. Наиболее распространенные формы колонн в египетской архитектуре. Рисунок И.И. Колосовой:

а – квадратная в сечении колонна, IV династия; б – восьмигранная колонна, XI династия; в – колонна с шестнадцатью гранями, XII–XVIII династии

Самой важной проблемой для египетских строителей была проблема перекрытия помещений, значительных в плане размеров и высоты. Если ранее, в примитивных хижинах, каркасы которых стали прототипом стоечно-балочной конструкции, несколько стволов достаточно легко выдерживали крышу, выполненную из веток или пальмовых листьев, то в случае, когда возникала необходимость перекрыть большое пространство, и при этом каменными плитами, потребовалось установить много массивных подпорок. Кроме того, надо было решить вопрос монтажа и установки таких колонн, т. к. их вес значительно увеличился.

Камень как основной строительный материал, использовавшийся в то время в Египте, представлен песчаником, гранитом, известняком, базальтом и др. Как правило, камень высекался из скал крупными глыбами, обрабаты-

вался до формы гигантских квадратов и доставлялся к месту постройки. В качестве раствора для кладки камней использовали смесь, состоявшую из извести, песка и глины. В отдельных случаях применяли кладку без раствора, т. е. «насухо» [3].

Другим распространенным в строительстве материалом стал кирпич-сырец размером  $14 \times 38$  см и толщиной не менее 11 см. Он изготавливался из смеси ила, мелкой гальки и рубленой соломы, которой заполняли деревянные формы и позже высушивали на солнце.

Квадратные колонны применяли при возведении объектов в период правления IV династии (древнеегипетская династия фараонов эпохи Древнего царства, правившая в 2639–2506 гг. до н. э.) и до конца Нового царства (1500–1100 гг. до н. э.). Колонны квадратного сечения использовали при строительстве погребального храма Хефрена, 1862 г. до н. э. (рис. 11, а, б). Размеры храма составляли  $45 \times 45$  м, высота – 12 м. В центральном зале расположено 16 колонн, выполненных из красного гранита. Кроме храма Хефрена колонны квадратного сечения использовали и в более поздний период при строительстве поминального храма Ментухотепа в Дейр-Эль-Бахри, ок. 2020 г. до н. э. (рис. 12, а, б). Святилище имело размеры в плане  $40 \times 22$  м. Перекрывавшая его плоская кровля опиралась на 108 колонн.

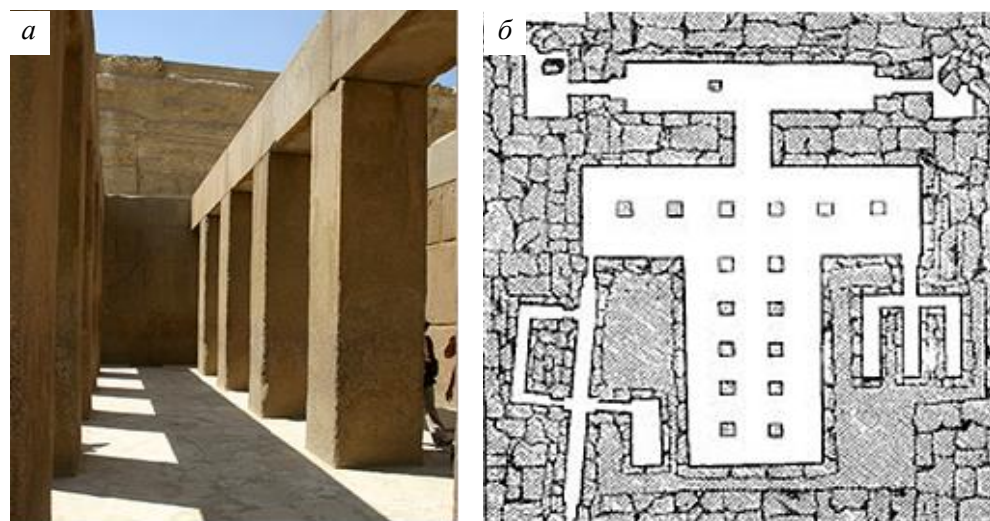


Рис. 11. Погребальный храм Хефрена, 1862 г. до н. э. (URL: <https://infourok.ru/metodicheskie-materiali-k-uroku-na-temu-drevniy-egipet-3030287.html>);

а – вид на колонну центрального зала храма с квадратными в плане колоннами;  
б – план храма

Заупокойный храм состоял из двух ступенчатых террас, окруженных крытыми колоннадами; нижняя имела площадь  $60 \times 50$  м, верхняя –  $42 \times 40$  м. По периметру располагалось 254 колонны [3].

Колонны выполняли не только монолитными, но и составными. В эпоху Среднего и в начале Нового царства их форма в отдельных случаях становилась



многоугольной в плане. Такие опоры были просты в изготовлении и более «легки и красивы» по внешнему виду. Думается, что первоначально стали обтесывать углы у квадратных колонн (рис. 10, *а*), что привело к появлению восьмигранных колонн (рис. 10, *б*). Восьмигранные колонны мы можем наблюдать на входе в гробницу номарха Хнумхотепа II в Бени-Хасане (рис. 13). Их можно увидеть в храме XI династии в Дейр-эль-Бахри. Продолжив обтесывание углов, египтяне получили колонны с шестнадцатью гранями (рис. 10, *в*) (Среднее и Новое царства).

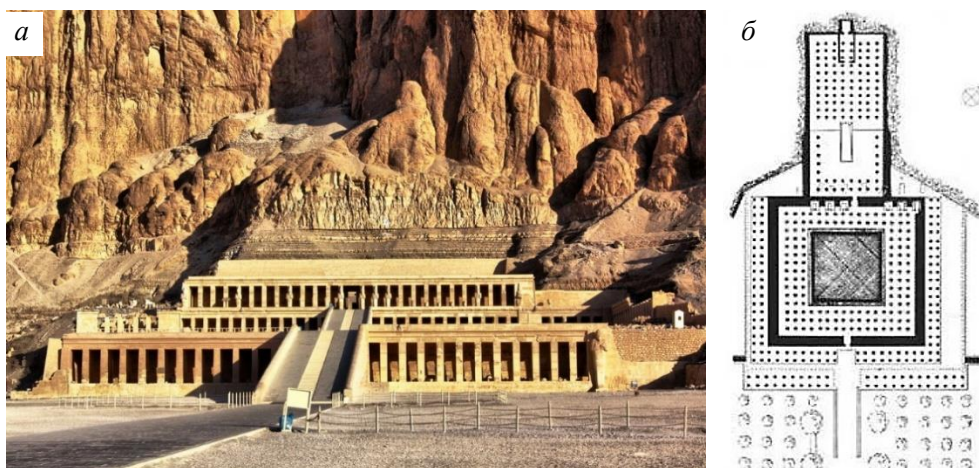


Рис. 12. Поминальный храм Ментухотепа I в Дейр-Эль-Бахри, ок. 2020 г. до н. э. (URL: <https://wiki-turizm.ru/login/entry/zagadka-khrama-khatshepsut>):  
*а* – общий вид; *б* – план поминального храма

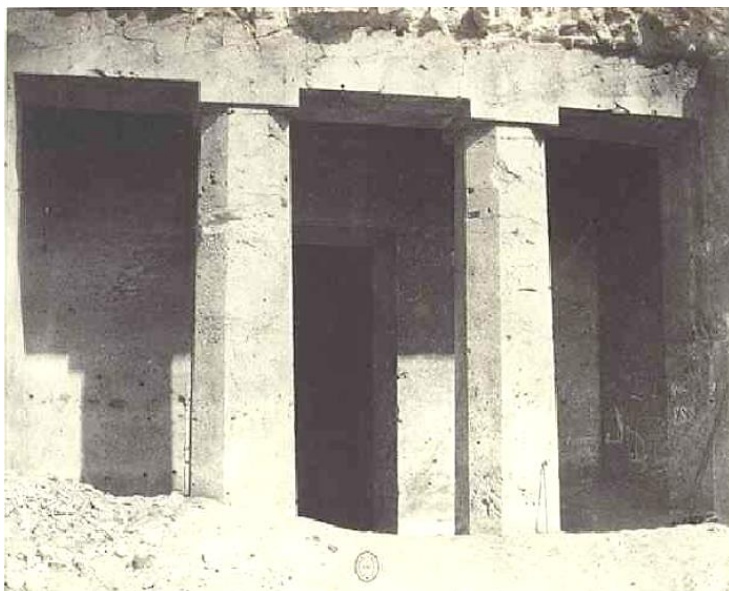


Рис. 13. Гробница номарха Хнумхотепа II в Бени-Хасане, первая треть II тыс. до н. э. (URL: <http://drevniy-egipet.ru/eksponaty-muzeya-metropolitena-v-nyu-j/>)

Примером сооружения, где использовали колонны с шестнадцатью гранями, является скальная гробница в Бени-Хасане, первая треть II тыс. до н. э. (рис. 14. а, б).

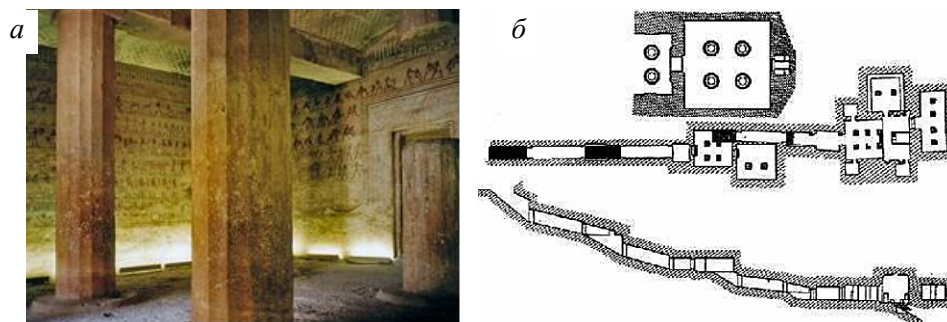


Рис. 14. Скальная гробница в Бени-Хасане, первая треть II тыс. до н. э. (URL: <https://studfile.net/preview/3556734/>):

а – колонна с шестнадцатью гранями; б – план гробницы

Позднее, в период Среднего царства, наблюдается поиск такого решения колонн, где их массивность была бы уменьшена, а сами опоры стали более стройными и приобрели более пластичную форму.

Кроме того, появились колонны, ствол которых равномерно утоньшается от основания к верху, что соответствует внешнему виду ствола дерева. Такие колонны выполняли не отдельно стоящими, а пристроенными к стенам, которые, в свою очередь, снимали нагрузку с колонн при укладке блоков и плит перекрытия на них (рис. 15, а, б).

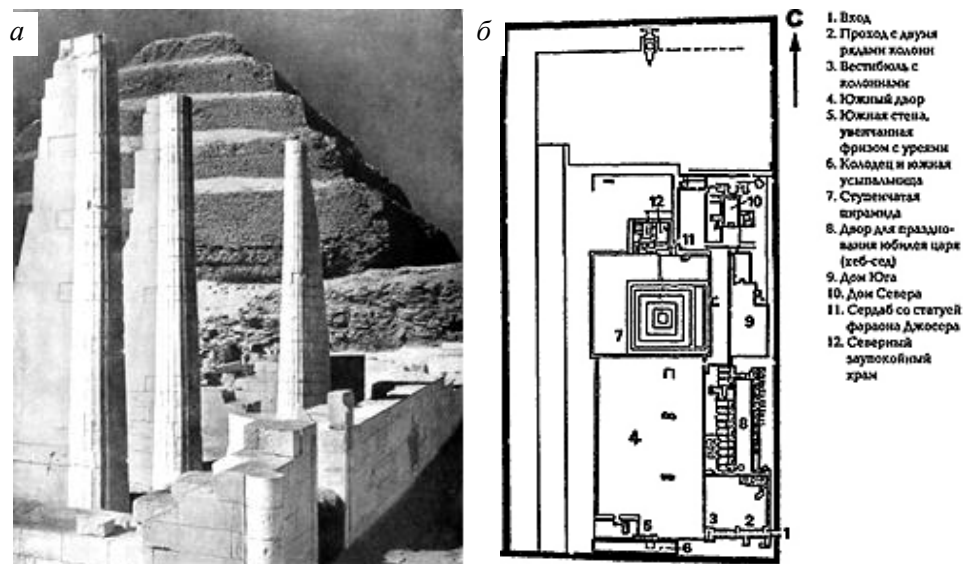


Рис. 15. Архитектурный ансамбль Джосера в Саккаре, Древнее царство (2700–2200 гг. до н. э.) (URL: <https://studfile.net/preview/3556734/>):

а – колонны около ступенчатой пирамиды Джосера в Саккаре; б – план ансамбля

Данные полуколонны были исключительно тонких не повторяющихся позже пропорций, высота колонн доходила до 24 нижних диаметров.

Таким образом, анализируя опыт возведения колонн в египетской архитектуре, можно утверждать, что здесь, как и в первых шалашеобразных объектах строительства, именно ствол дерева стал основой практически в своем естественном природном виде, конструктивным решением вертикальных опорных конструкций. Иными словами, именно природа, и в частности составные части дерева и принципы его крепления в земле, позволили зодчим разработать и активно применять в строительстве, при этом постоянно совершенствуя технические характеристики, стоечно-балочную систему. Корни – фундамент, ствол – колонна, отходящие в стороны ветки – балки. В последующие эпохи систему продолжали улучшать, апробируя на практике все большее число возможностей, заложенных природой в дереве.

Так, чтобы уменьшить массивность колонн, сделать их более высокими и отдельно стоящими и, как результат, увеличить высоту возводимых сооружений, было предложено расширить по трапеции, подобно кроне дерева, зону опирания балки на стойку. Этот прием позволил более рационально распределить внутренние усилия. Кроме того, итогом такого приема стало появление капители, которая, с одной стороны, выполняла роль нового конструктивного элемента, а с другой – эстетически значимого объекта. Плоскости капители были украшены декором, каждый из которых относился к тому или иному ордеру.

Следующим этапом стало решение вопроса об увеличении прочностных характеристик колонны, что позволило бы перекрывать большие пролеты и строить еще более высокие сооружения. Так у колонны появилась база – расширяющаяся нижняя часть, которая переносит нагрузку на основание – конструктивное решение, подобное корневой системе дерева.

В период Нового царства (1550–1069 гг. до н. э.) и более позднее время ордер с колоннами, подражающими формам растительного мира, стал основным в храмовых постройках. При этом сформировалась определенная классификация наиболее часто используемых типов колонн. Однако в основе приемов их формообразования, как правило, лежал единый принцип – стилизованное воспроизведение в камне ствола, бутона или цветка таких распространенных и священных в Египте растений, как папирус, лотос и пальма [5]. Бельгийский архитектор Анри Ван де Вельде писал: «Неизбежным следствием глубокого преклонения перед природой и природными силами являлось то, что древние считали себя обязанными превращать в деревья колонны, которые должны были служить всего лишь опорами для покрытия; их листья обобщались в небольшое количество листьев, образующих капитель...» [7].

Подобное высказывание принадлежит Г. Гегелю: «Более естественной, органической формой для столбов и опор является дерево, вообще ствол, гибкий стебель, перпендикулярно устремленный вверх. Ствол дерева уже сам по себе поддерживает свою крону, стебель – колос или цветок. Египетское зодчество, еще не освободившееся в той мере, чтобы осуществлять абстрактный характер своих намерений, заимствует эти формы непосредственно из природы... Мы видим здесь величайшее многообразие колонн, возникающих из форм растительного царства, видим, как растягиваются и вытягиваются вверх

лотосы и другие растения, чтобы стать колоннами... Целое еще не представляет собой рассудочно правильные формы, а основание походит на луковицу; из корня показываются листья, как у тростника, или возникает иной пучок корневых листьев, подобно различным растениям. Из этого основания прямо вверх поднимается или высится, сплетаясь, как витая колонна, гибкий стебель; капитель тоже представляет собой расхождение листьев и ветвей, подобное цветку» [7].

Другим специалистом, кто подтверждает взаимосвязь природы и стоечно-балочной системы, стал архитектор Е.Н. Поляков, он пишет, что изображения растений на стенах древних святилищ и храмов, в скульптурной детализировке карнизов, колонн, цоколей и т. д. являются интерпретацией Мирового Дерева. Это был один из символов Мирового Столпа или Оси Вселенной, где дерево играет роль Космической лестницы и связывает между собой все уровни мироздания – Небо, Землю и Преисподнюю [Там же].

Колонны ордера представляют собой воплощение в камне их древних прототипов из тростника и глины. Прimitивную колонну выполняли из пучка папируса, плотно связанного у основания и у самого верха, непосредственно у соцветия. Соцветия представляли собой большой «зонтик», где букет цветущих стеблей свисает со всех сторон. На стебли, связанные наверху, клали легкую перекладину, под тяжестью которой соцветия прогибались наружу, скрывая место перевязи. Тростниковую колонну устанавливали на круглое глиняное основание и густо обмазывали глиной. Ряд таких колонн был достаточно крепок, чтобы выдержать легкую перекладину, представляющую собой архитрав, на который, в свою очередь, опиралась плетеная крыша (рис. 16). Когда такие колонны стали изготавливать в камне, капитель вырезали в виде бутона лотоса с едва раскрытой чашечкой и появившимися внутри лепестками. Такое решение было самым распространенным типом египетской колонны.



Рис. 16. Росписи из гробницы писца Нахта, на которых изображены прототипы каменных колонн в хижинах. Фивы, Древний Египет, Новое царство, конец XV в. до н. э. (URL: <http://stroy-server.ru/notes/arkhitektura-drevnego-egipta>)



Другим прототипом колонны стал пальмовый ствол. Здесь, в отличие от тщательности, с какой связки папируса воспроизводятся в папирусовидной колонне, стержень колонны имеет идеальную цилиндрическую форму и не суживается у основания. При этом обвязка под листьями пальмы изображается скрупулезно, а сами листья изгибаются естественным образом (рис. 17).

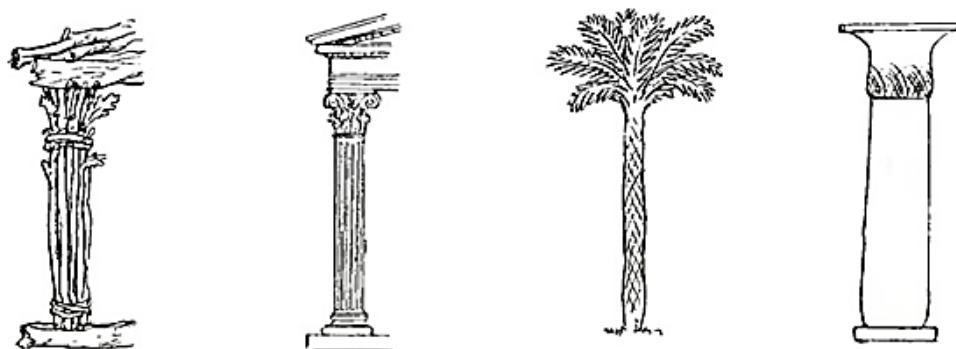


Рис. 17. Этапы формообразования древнеегипетских колонн (URL: <http://stroy-server.ru/notes/arkhitektura-drevnego-egipta>)

Изобретение капители в виде бутона по прошествии времени привело к появлению капители в виде распустившегося цветка, однако стержень всегда остается цилиндрическим. Чашечка цветка часто изображается у основания капители, однако лепестки не воспроизводятся, и у капители гладкая поверхность. Изображение перевязи сохраняется на стержне колонны, как и у капители, в виде бутона лотоса (рис. 18).

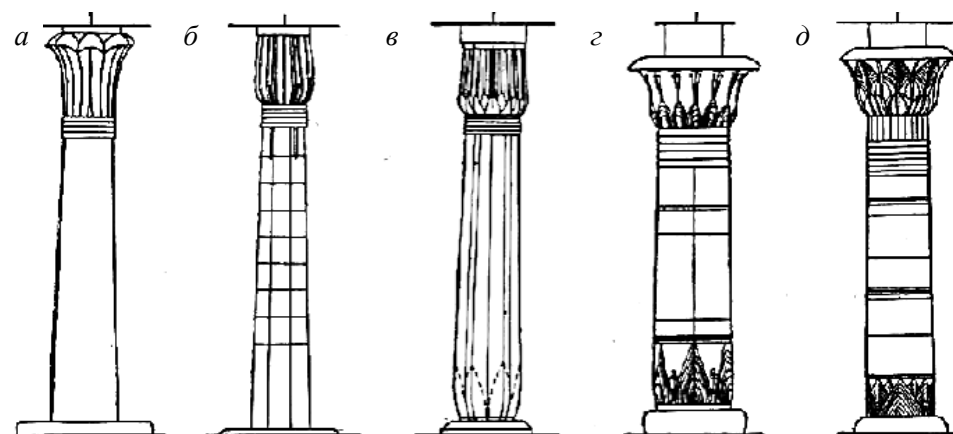


Рис. 18. Типы древнеегипетских колонн (URL: <http://stroy-server.ru/notes/arkhitektura-drevnego-egipta>):

*a* – с гладким стволом и пальмовидной капителью; *б* – лотосовидная; *в* – папирусовидная; *г, д* – композитные

Именно в эпоху Нового царства (XVI–XI вв. до н. э.) наступает самый яркий период расцвета храмового строительства. И именно с этого момента

можно говорить о массовом строительстве сооружений с применением древовидных колонн. В этот же период формируется архетип монументального наземного храма и возводятся наиболее крупные храмовые комплексы Древнего Египта: храм Амона (бога Солнца) в Карнаке (начало II тыс. – I в. до н. э.) и храм Амона в Луксоре (XV – середина XIII в. до н. э.).

Конструктивно-декоративную основу Луксорского храма составляют изящные, выполненные из песчаника колонны в виде связки папируса. Капители храма имитируют стилизованные зонтики в бутоне папирусного растения (рис.19).



Рис. 19. Луксорский храм, 1400 г. до н. э., Египет (URL: <http://totalarch.ru/node/487>):  
а – колонны как прообраз связки растений папируса; б – растение папирус

Луксорский храм в плане представляет собой систему прямоугольников, расположенных вдоль общей оси симметрии, протянувшейся с севера на юг вдоль берега р. Нил. Планировка храма отличается исключительной четкостью – помещения всех прямоугольников-объемов расположены практически симметрично. Сдвоенные ряды колонн, выполненных в виде связок папируса, обрамляют широкий открытый двор. К северной стороне двора примыкает гигантская колоннада, которая осталась недостроенной. Ее четырнадцать монументальных, изумительно совершенных по пропорциям колонн 20-метровой высоты воспринимаются поразительно легкими. Капители колонн украшены цветком папируса, при этом на колоннаде центрального прохода цветок выполнен распустившимся, а на колоннаде двора – в виде бутона. Вход в святилище ведет через соединенный с двором великолепный вестибюль с тридцатью двумя колоннами, также изготовленными в виде связок папируса (рис. 20) [3].

В этот же временной промежуток параллельно с египетской активно развивалась индийская архитектура. Примеры колонн как прообраза дерева в Индии встречаются в архитектуре скальных пещер Аджанты, построенных во времена Сатаваханы и Вакатаки (200 г. до н. э. и до 500 г. н. э.). Аджанта – это комплекс пещерных храмов, создавая которые зодчие вдохновились религиозно знаковыми и священными растениями, такими как лотос и амалака.

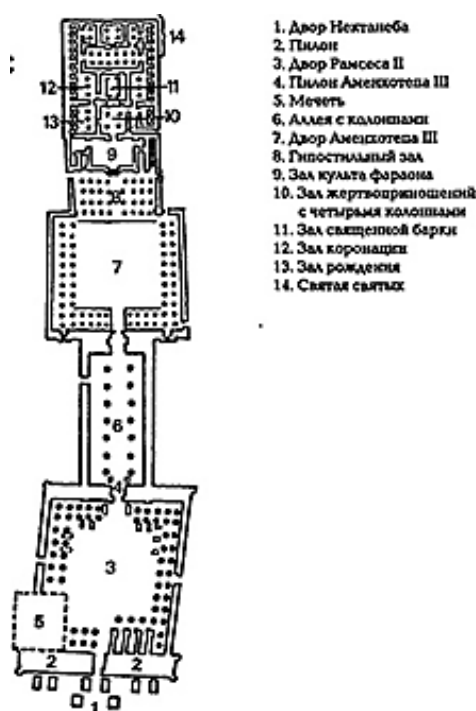


Рис. 20. Храм Амона в Луксоре (XV – середина XIII в. до н. э.). План этажа (URL: <http://totalarch.ru/node/487>)

Все храмы похожи друг на друга и представляют собой большой квадратный зал с расположенными по периметру к нему маленькими кельями (рис. 21, а, б).

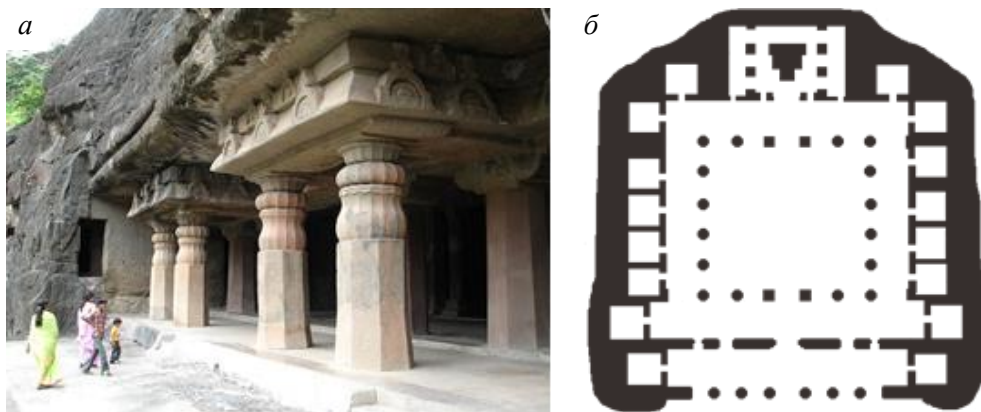


Рис. 21. Пещерный храм Аджанга, Индия, 200 г. до н. э. (URL: <http://totalarch.ru/node/487>): а – колонны с лотосовыми капителями; б – план храма

По бокам зала, отделенные колоннадами, находятся боковые проходы, предназначенные для религиозных процессий. Потолки пещер поддерживают

резные или покрытые росписями колонны, резные колонны украшают и входы в пещеры.

Разнообразные приемы использования деревьев и растений в формообразовании колонн также широко применялись в греческих колоннах. Так, античные греки в качестве прообраза для формирования верхней части колонны – капители – активно использовали форму листьев аканта – травянистого растения с интересными декоративными свойствами. Так появились колонны коринфского ордера.

Происхождение ордеров, как дорического, так и ионического, от деревянной стоечно-балочной конструкции не вызывает сомнений. Важнейшие элементы дорического ордера – триглыфы и метопы – имели свои прототипы в дереве (рис. 22, *а, б*). Триглыфы изображают орнаментированные торцы деревянных балок перекрытия, а метопы – плиты, закрывавшие пространство между триглыфами. Сходство ордеров с деревянным каркасом объясняется постепенным, достаточно механическим переносом традиционных форм дерево-сырцовых храмов в новый строительный материал – камень.

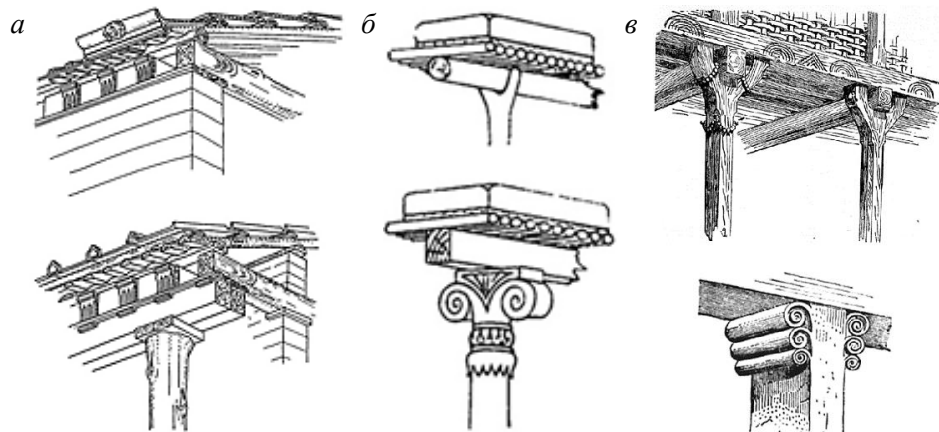


Рис. 22. Прототипы ордеров в дерево-сырцовых постройках (URL: <http://totalarch.ru/node/200>):

*а* – дорического; *б* – ионического

Уже в VII в. до н. э. в архитектуре Греции особенно активно начинается строительство с использованием нового материала – камня, главным образом это был известняк белого, желтоватого и сероватого цветов. Камень подвергался первоначальной обработке, приобретая форму квадров, монолитных стволов и отдельных барабанов колонн. Как правило, стволы колонн вырубались в карьере сразу круглыми с учетом их утонения (рис. 23, *а*). С этой целью в скале прорезали узкие кольцообразные ходы, очерчивающие необходимую массу и размеры камня. Вес колонн достигал иногда 18 т. Для транспортирования таких блоков использовали колеса-катки (рис. 23, *б*). Подъем каменных блоков осуществляли с помощью специальных, вырезанных в теле элемента пазов и канов. Завершающая отделка производилась после окончательной установки блоков на место [4].



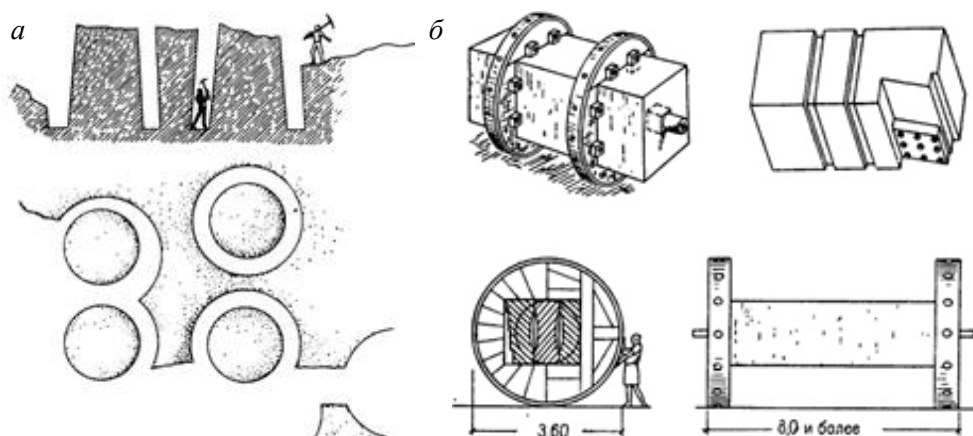


Рис. 23. Процесс создания колонн, Греция, VII в. до н. э. (URL: <https://helpiks.org/7-64006.html>):

*а* – вырубка барабанов колонн в античной каменоломне; *б* – катки для транспортировки барабанов колонн

В дальнейшем ордер совершенствовался за счет разработки типов форм, соответствующих возможностям нового строительного материала. Изменялись соотношения несущих и несомых частей ордера, пропорции и формы ствола колонны. Опора стала не только легче, за счет сужения кверху, но и приобрела упругие очертания, которые подчеркнули ее главную функцию – несущую.

В свою очередь, формы ионического ордера также связаны с деревянной стоечно-балочной конструкцией. Другое дело, что в данном случае характер составных частей определялся другим строительным материалом – лесом более мелкого размера. Климат, менее суровый, чем в горных районах материковой Греции, привел к распространению в первую очередь плоской земляной кровли, которая укладывалась по горизонтальному настилу из мелкого леса, расположенному непосредственно на главных балках. Скатная кровля встречалась редко.

Анализ изученного материала позволяет утверждать, что ордера появились в древнегреческих общественных сооружениях в момент перехода от дерево-сырцового строительства к строительству из камня.

Следует отметить, что в Китае еще в VIII в. до н. э. был создан собственный архитектурный ордер, – ордер своеобразный и значительно отличающийся от известной классической ордерной системы Египта, Индии и Греции. Здесь, так же, как и в предыдущих случаях, самыми распространенными объектами, где использовались колонны, являлись всевозможные виды гробниц. Часть из них была высечена непосредственно в толще гор, другие создавались на площадках, расположенных в специально вырубленном для этой цели пространстве между скалами. Наиболее интересен ханьский период (206 г. до н. э. – 220 г. н. э.) как время, когда подземные помещения с массивными каменными прямоугольными входами и многочисленными комнатами стали самым массовым видом строительства. Уходящие кверху, решенные в форме ступенчатого свода потолки разделялись посередине низко нависшими балками и поддержи-

вались восьмигранными столбами, стоящими по одному в центре каждой комнаты. Такие опоры завершались грандиозными капителями, известными как доу-гуны. Они представляли собой изогнутые дугой крупные каменные брусья, на концы которых опирались плиты перекрытия.

Конструктивно-декоративные решения подобных доу-гунов были разнообразны. Например, в Китае в музее могил Иньянь Хань, расположенном в Инане, выполнено интересное решение доу-гуна. Музей состоит из выставочного зала для демонстрации гробниц всё той же династии Хань. Самая большая и богато украшенная гробница занимает площадь 44,2 м<sup>2</sup>. Всё её пространство разбито на восемь комнат различной величины (рис. 24). Композиционным центром в отдельных помещениях являются колонны с опирающимися на них доу-гунами. На одном из таких доу-гунов от центральной дуги в обе стороны широко расходятся две также изогнутые каменные опоры, выточенные в виде крылатых фантастических зверей. Создается иллюзия, что чудовища как будто вылезли из потолка до середины туловища и пытаются прогрызть каменную массу капители (рис. 25).

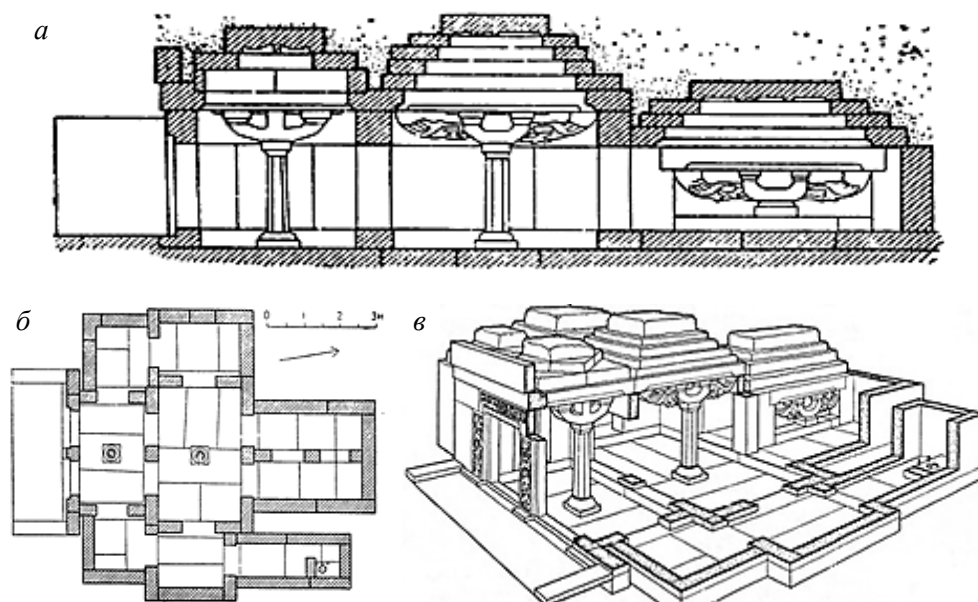


Рис. 24. Музей Династии Хань (206 г. до н. э. – 220 г. н. э.) в Инане, Китай (URL: <http://cherepanova.tehne.com/event/arhivsyachina/arhitektura-stran-dalnego-vostoka-kitay-koreya-yaponiya-epochi-drevnego-mira>):  
а – разрез; б – план этажа; в – общий вид

Следует отметить, что в описываемую эпоху в Китае в надземном строительстве конструкция доу-гунов претерпела значительные изменения. Если в ранних постройках гробниц в Китае и в основной массе европейских построек крыша опиралась непосредственно на опоры, то в данном случае она отделена от них за счет сложной конструктивной системы карниза, состоящего из целого ряда деревянных элементов в виде балок (доу) и особых кронштейнов (гун),

о которых говорилось ранее и которые получили название «доу-гун». По форме каждый кронштейн – гун – напоминает стрелковый лук (рис. 26) [6]. Располагаясь друг над другом относительно оси общей опоры (колонны) и перпендикулярно также относительно друг друга, кронштейны составляли суть новой конструкции – консольной капители доу-гун. При этом новая конструкция соответствовала принципам организации ветвей дерева – его кроны.

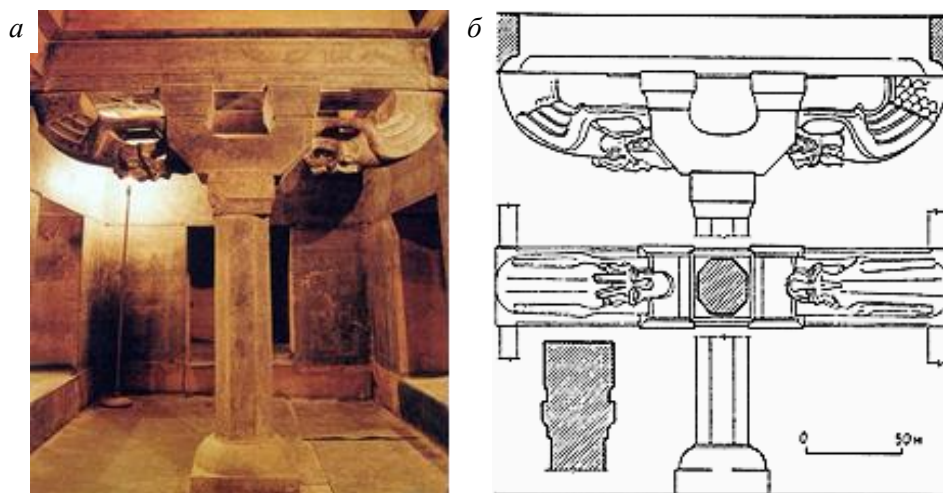


Рис. 25. Колонны с консольными капителями доу-гун в музее, Инань, Китай. Династия Хань (206 г. до н. э. – 220 г. н. э.) (URL: <http://cherepanova.tehne.com/event/arhivsyachina/arhitektura-stran-dalnego-vostoka-kitay-koreya-yaponiya-epochi-drevnego-mira>)

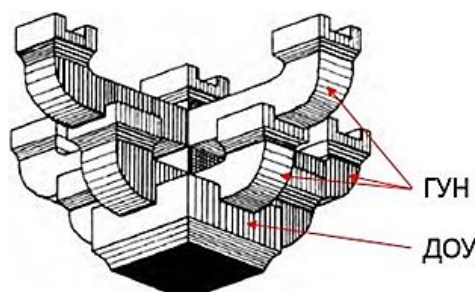


Рис. 26. Конструкция консольной капители доу-гун. Рисунок Д.А. Вадяевой

Система доу-гун связывала балку и опору и одновременно выполняла роль своеобразной капители столба, названной, как отмечалось ранее, «консольная капитель». Балки воспринимали нагрузку от крыши и передавали ее на столбы, нагрузка распределялась по кронштейнам и рассеивалась на пути к колонне, что значительно увеличивало прочность данной конструкции. Предложенная связь вертикальных и горизонтальных элементов здания, несущих нагрузку от его верхней части, стала отличительной особенностью китайской архитектуры.

Как отмечалось, все кронштейны устанавливались перпендикулярно относительно друг друга и соединялись между собой с помощью пазов (рис. 27). При этом такой процесс компоновки отдельных доу-гунов мог продолжаться, пока конструкция не достигнет необходимой высоты и заданной проекции. Таким образом, количество кронштейнов могло варьироваться от 106 в самых сложных конструкциях и до 5 в самых простых [6].

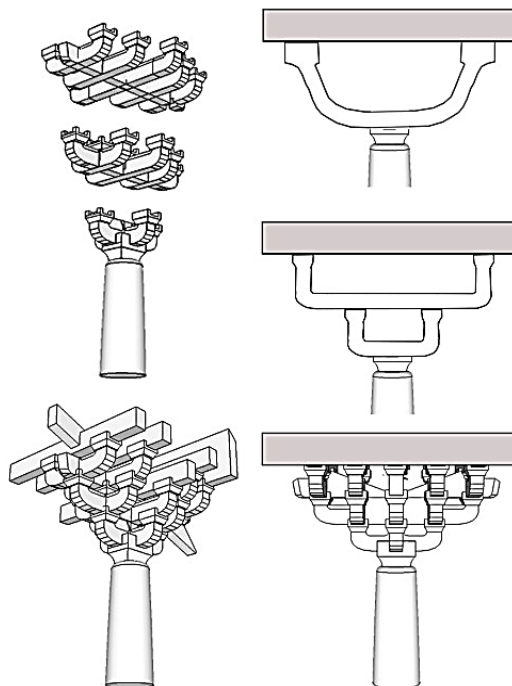


Рис. 27. Типовая схема сборки кронштейнов доу-гун. Рисунок Д.А. Вадяевой

Особо хочется подчеркнуть, что конструкция доу-гун с точки зрения механики очень устойчива при землетрясениях за счет своей плотной взаимоблокировки отдельных деталей даже без крепежных элементов. Благодаря такому приему древние здания не разрушались на протяжении веков.

В отличие от культовых и общественных архитектурных объектов, жилище в Китае традиционно строилось из дерева. Именно поэтому примеры жилых сооружений представлены только в виде моделей – макетов, выполненных из керамики, или рисунков, которыми были расписаны стены в гробницах. Самое большое количество керамических моделей жилых построек сохранилось в гробницах периода Хань (206 г. до н. э. – 220 г. н. э.). В постройках высотой до трех этажей ясно читается крупный деревянный каркас, галереи и балконы (рис. 28). Здесь, как и в ранее описанных объектах, главным конструктивным решением является использование системы доу-гун.

Анализируя изученный материал, необходимо добавить, что описанная конструкция доу-гун просуществовала достаточно продолжительный период, ее активно использовали вплоть до Средневековья.

Сказанное позволяет сделать вывод, что в отличие от европейской, как правило дворцовой архитектуры, архитектурные особенности китайских сооружений отличаются максимальной функциональностью и наибольшей приближенностью к природе, особенно в части заимствования конструктивных решений. Китайские зодчие не стремятся к крупным монументально-тяжеловесным каменным конструкциям. Они в первую очередь стараются органично вписать свои архитектурные сооружения в окружающий пейзаж или в другом случае воссоздать понравившуюся природную панораму вокруг постройки таким образом, чтобы они сочетались друг с другом. «Парящие» крыши и каркасно-столбовые конструкции доу-гун как будто повторяют форму дерева с его стволом и кроной.



Рис. 28. Керамическая модель деревянных домов эпохи династии Хань, Китай (206 г. до н. э. – 220 г. н. э.), показывающая применение консоли доу-гун (URL: <http://cheranova.tehne.com/event/arhivsyachina/arhitektura-stran-dalnego-vostoka-kitay-koreya-yaponiya-epohi-drevnego-mira>)

Е.Н. Поляков пишет: «Здание не противостоит окружающему миру своими массивными стенами, не “облагораживает” природу, а живет, растворяясь в ней, чутко реагируя на её энергетические потоки» [7].

Отдельно отметим, что именно искусство Древнего Китая, в особенности периода Хань, имело огромное значение для развития системы и приемов строительства в других странах Востока: Японии, Корее, Индо-Китае, Монголии. Эти страны в течение многих веков использовали разработанные и апробированные временем достижения Китая.

В течение последующих веков колонна серьезно изменилась как со структурной, так и эстетической точки зрения.

Самые значительные преобразования связаны с тиражированием массовых построек, начавшихся в 1950-е г. XX в. Необходимость вести послевоенное строительство «быстро и экономически выгодно» привела к типовой «упрощенной» архитектуре, что в свою очередь создало упрощенные геометрические формы колонны.

В настоящее время вид современных колонн имеет максимально утилитарный характер (рис. 29, 30).

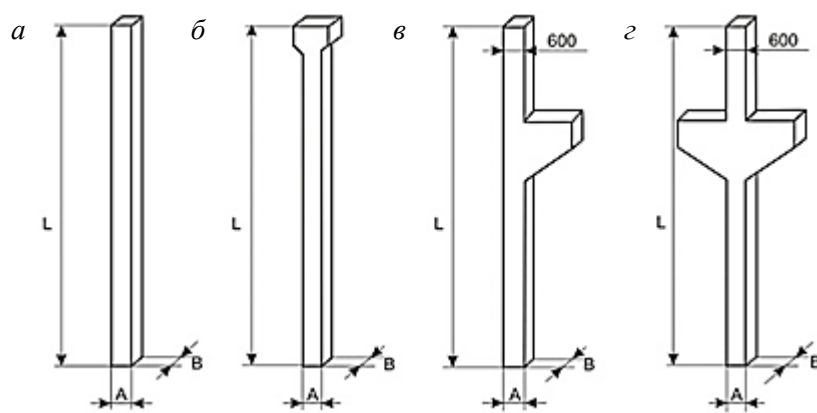


Рис. 29. Виды железобетонных колонн. Рисунок Д.А. Вадяевой:

а – колонна сплошного сечения; б – то же с консолями для опирания стропильных конструкций; в – одноветвевая колонна с консолями для опирания подкрановой балки; г – двухветвевая колонна

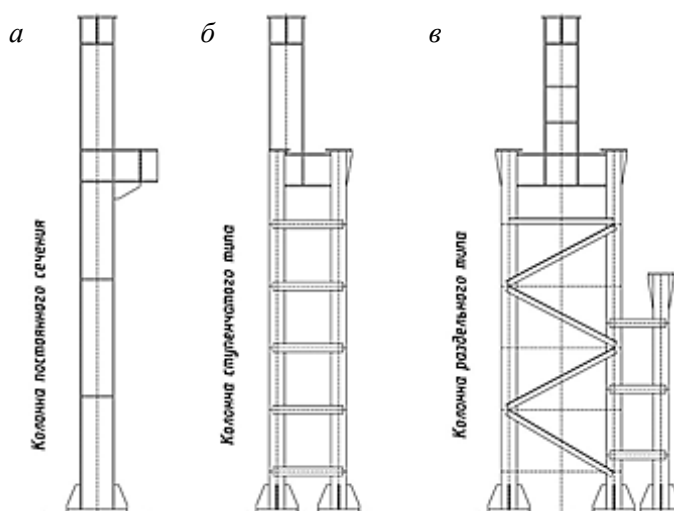


Рис. 30. Виды металлических колонн. Рисунок Д.А. Вадяевой:

а – одноветвевая колонна; б – двухветвевая колонна; в – ступенчатая колонна переменного сечения

От дерева остались только названия – одноветвевая и двухветвевая колонны. При этом сам образ ограничен требованиями прочности и устойчивости. Визуальное восприятие конструкций в России осталось вне внимания специалистов.

Одновременно в современной зарубежной архитектуре развитие конструктивного решения колонны как прообраза дерева продолжается за счет преимуществ, обусловленных принципом работы этого растения. Более того,

такие колонны получили название – дендриформы. Данное понятие было введено за рубежом еще в 1970 г. немецким инженером Фраем Отто и не имеет русской интерпретации.

Дендриформа – по определению и по сути является имитацией формы дерева или растений. Древовидная ветвящаяся структура также известна специалистам, как «дендритная структура». В свою очередь, «дендрон» – греческое слово, означающее «дерево», и именно поэтому термин «дендритная структура» используется для описания ветвящейся структуры. Другим аналогом выражения «древовидный» является «древесный», что также означает «относящийся к дереву или напоминающий его».

Таким образом, подчеркнём, что за 4 тыс. лет конструкция колонны прошла путь от использования природного дерева до совершенной стоечно-балочной системы, повсеместно используемой в строительстве. Особенно интересен этап Средневековья, когда впервые в истории архитектуры колонны стали ветвиться как у настоящего живого дерева, а ветви и стволы каменных деревьев стали сознательно отклоняться от прямого угла и строго вертикального положения. Позднее разработанные приемы создания древовидных колонн стали широко использоваться в разнообразных архитектурных стилях и были воплощены в различные современные материалы.

В результате они стали как бы знаками самих себя, образуя все более замкнутый мир геометрического и технического совершенства. Думается, что дальнейшее развитие архитектуры определит возвращение строительства и его конструктивных составляющих в мир природного формообразования со всем его богатством и уникальностью каждого растения.

### **Заключение**

Анализ жилища первобытных людей в разных странах Древнего мира позволяет утверждать, что его вид зависел от климата и особенностей местности, имеющихся природных ресурсов, образа жизни людей и их бытовых навыков и умений.

Жилища, построенные древними людьми, можно разделить на три основных типа по времени их создания: простейшие убежища разных видов, шалашеобразные конструкции и жилища долговременного характера с жестким остовом.

В течение более 1 млн лет в различных странах с разными природно-климатическими особенностями основным объектом, который сыграл роль прообраза для формообразования и формирования конструктивных характеристик вертикальных опор для сооружений разного функционального назначения, стало дерево. Соответствие опоры-колонны стволу дерева было не только внешнее, но и, главным образом, конструктивное (см. рис. 5). Развилка между стволом и ветками выступала как первое приспособление для опирания балок (стволов-ветвей).

На протяжении дальнейшего развития мировых цивилизаций стоечно-балочная конструкция продолжала совершенствоваться, по-прежнему опираясь на конструктивные возможности своего прообраза – дерева.

Несмотря на длительный период развития и становления строительного производства от первого шалаша до современных построек, основные идеи зодчие по-прежнему заимствуют из мира природы.



В средневековый период в строительстве появились более сложные конструкции, возможности которых также были заимствованы из мира природы.

Все последующие поиски новых конструктивных возможностей стоечно-балочной системы осуществлялись за счет изучения уже привычного мира природы, только теперь в части использования более широкого выбора строительных материалов. Так промышленная революция XIX в. сделала возможным использование в архитектуре таких материалов, как бетон и металл.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Первые жилища* // Коротко и ясно о самом интересном. URL: <http://xn----stb8d.xn--p1ai/tag/pervye-zhilishha/> Первые жилища/
2. *Глазычев В.Л.* Зарождение зодчества. Москва : Стройиздат, 1983.
3. *Шуази О.* Архитектура Древнего Египта. История архитектуры. Т. I. Москва, 1935 (переиздание, 2002). С. 7–76.
4. *Всеобщая история архитектуры* (ВИА): в 12 т. Т. 2. Архитектура античного мира (Греция, Рим). Москва : Стройиздат, 1973. 712 с.
5. *Михаловский И.Б.* Теория классических архитектурных форм. Москва : URSS : Librokom, 2011. 285 с.
6. *Ащепков Е.А.* Архитектура Китая. Москва, 1959. 540 с.
7. *Поляков Е.Н.* Образ вселенной в культовом зодчестве Древнего мира. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2009. 434 с.

#### REFERENCES

1. Pervye zhilishcha [The first dwellings]. Available: <http://xn----stb8d.xn--p1ai/tag/pervye-zhilishha/> Pervye zhilishcha (rus)
2. *Glazychyev V.L.* Zarozhdenie zodchestva [Origins of architecture]. Moscow: Stroyizdat, 1983. (rus)
3. *Choisy A.* Istoriya arkhitektury [The history of architecture], vol. 1, Moscow, 2002. (transl. from Fr.)
4. *Vseobshchaya istoriya arkhitektury* [General history of architecture], in 12 vol., vol. 2. *Arkhitektura antichnogo mira* (Gretsiya, Rim) [Architecture of the Ancient World (Greece, Rome)]. Moscow: Stroyizdat, 1973. 712 p. (rus)
5. *Mikhailovsky I.B.* Teoriya klassicheskikh arkhitekturnykh form [Theory of classical architectural forms]. Moscow: URSS, Librokom, 2011. 285 p. (rus)
6. *Ashchepkov E.A.* Arkhitektura Kitaya [Architecture of China]. Moscow, 1959. 540 p. (rus)
7. *Polyakov E.N.* Obraz vselennoi v kul'tovom zodchestve Drevnego mira [The image of the universe in cultural architecture of the Ancient world]. Tomsk: TSUAB, 2009. 434 p. (rus)

#### Сведения об авторах

*Колосова Ирина Ивановна*, канд. архитектуры, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kolosova1601@yandex.ru

*Вадяева Дарья Анатольевна*, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, antipova.darya96@mail.ru

#### Authors Details

*Irina I. Kolosova*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kolosova1601@yandex.ru

*Dar'ya A. Vadyaeva*, Undergraduate, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, antipova.darya96@mail.ru



УДК 72.035

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-73-82

*П.В. ЗАЛЕСОВА, Т.Н. МАНОНИНА, Н.В. ВАСИНА,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

## **«СТИЛЬ ДРАКОНОВ» В АРХИТЕКТУРЕ РОССИИ НАЧАЛА XX В.**

В статье рассматривается архитектура зданий, построенных в России в начале XX в., которые ассоциируются со «стилем драконов», распространенным в западноевропейской архитектуре эпохи модерна. Дается общее понятие мифологического и фольклорного образа дракона в культурах разных стран на примерах образцов народной и культовой архитектуры. Рассматривается деятельность основателя и лидера «стиля драконов» норвежского архитектора Х.Х. Мунте по формированию национальной программы этого направления на примере его основных сооружений. Впервые дается общий обзор построек, в которых нашли отражение национально-романтические тенденции «стиля драконов» в Российской империи. Анализируются известные (на сегодняшний день) проекты и постройки этого стиля в застройке городов Омска, Томска, станции Вырица Царскосельской железной дороги и проектах технических сооружений на Кругобайкальской железной дороге в начале XX в.

**Ключевые слова:** архитектура; стиль модерн; национальный романтизм; образ дракона; «стиль драконов»; Х.Х. Мунте; В.Ф. Оржешко; станция Вырица; Томск; Омск; Кругобайкальская железная дорога.

**Для цитирования:** Залесова П.В., Манонина Т.Н., Васина Н.В. «Стиль драконов» в архитектуре России начала XX в. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 4. С. 73–82. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-73-82

*P.V. ZALESOVA, T.N. MANONINA, N.V. VASINA,**Tomsk State University of Architecture and Building*

## **DRAGESTIL IN RUSSIAN ARCHITECTURE EARLY IN THE 20th CENTURY**

The article discusses the architecture of buildings erected in Russia early in the 20th century, which are associated with the dragestil common to Western European architecture of the modern era. The general dragestil concept in cultures of different countries is given on the examples of folk and cult architecture. The article considers the activities of Holm Hansen Munthe, the founder and leader of the dragestil in Norway who developed the national program of this style. For the first time, a general overview is given for buildings that reflect the dragestil national romanticism in the Russian Empire. The article analyzes the well-known dragestil projects and buildings in the cities of Omsk, Tomsk, Vyritsa station in the Tsarskoye Selo Railway and the Circum-Baikal Railway early in the 20th century.

**Keywords:** architecture; Art Nouveau; national romanticism; dragestil; Holm Hansen Munthe; V.F. Orzheshko; Vyritsa station; Tomsk; Omsk; the Circum-Baikal Railway.

**For citation:** Zalesova P.V., Manonina T.N., Vasina N.V. Stil' drakonov v arkhitekture Rossii nachala XX v. [Dragestil in Russian architecture early in the 20th century]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 4. Pp. 73–82. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-73-82

Дракон как мифологический и фольклорный образ издавна встречается в символике разных стран и культур. Представления о природе и смысле его изображения отличаются в разных регионах, однако такие образы можно найти в качестве артефакта почти в каждой культуре, известной человеку. Мы встречаем символ дракона в геральдике, буквицах древних книг, картинах и фасадной резьбе деревянных построек. Первые упоминания об этом древнем, легендарном существе уходят вглубь веков: прототип дракона появляется уже в культуре Месопотамии в качестве персонажа мифов и изображений.

Из-за сложной множественной семантики, отличающейся от культуры к культуре, дракон стал предметом исследования многих учёных. Например, Н.Н. Курина проводит семиотический анализ урнесской резьбы [1]. Как известно, архитектурные формы северного модерна были во многом вдохновлены древними церквями-ставкирхами в Урнесе и Боргунне XII в. Е.Н. Поляков подчеркивает отличие понимания образа дракона в китайской традиции от европейской. Особое внимание уделяет культовым сооружениям и роли образа дракона в истории Древнего Китая. Е.Н. Поляков пишет, что древнекитайский культ священных драконов отличается от западноевропейской традиции: «Восточный дракон не является ужасным монстром, плодом средневекового воображения. Он являлся гением и символом доброты и силы. Дракон – это дух изменения, а поэтому дух самой жизни. Он скрывается в пещерах неприступных гор или погружается в недоступные глубины моря, ожидая там времени пробуждения и действия. Он раскрывается в грозных тучах, он умывается своей гривой во мраке бурлящих водоворотов. Его когти в изгибах молний, его чешуя искрится в коре сосновых деревьев. Его голос слышится в урагане, который катится по ослабевшему лесу, пробуждая его к новой весне...» [2]. Г.М. Крюкова в своем исследовании проводит сравнительный анализ роли образа дракона в азиатских культурах и восточноевропейской и заключает, что в отличие от азиатской традиции в восточно-европейской культуре образ дракона появляется эпизодически, тогда как в азиатских культурах это символ устоявшийся, традиционный и прецедентный [3].

Традиционным элементом деревянного дома на Руси являлся так называемый охлупень – бревно, закрывавшее верхний стык скатов крыши. Он всегда являлся главенствующей деталью жилища, «голова» дома, и недаром его именovali «князь» («кнес»), «князек». В северорусских деревнях данный элемент испокон веков был предметом особой гордости хозяев и творческого соревнования. Подобное отношение к верхней части жилища, как и его декорирование фигурами различных животных или мифологических существ (драконы и проч.), в принципе распространено среди европейских народов. Важно при этом, что украшение кровли дома имеет очевидную региональную и, судя по всему, этническую специфику. У русских, как правило, охлупень имеет декоративное скульптурное завершение в виде головы коня, и именно поэтому наиболее распространенным названием данной детали является «конек». На Русском Севере встречаются двуглавые коньки, смотрящие врозь либо обращенные друг к другу. Помимо охлупня, традиционно украшались изображениями коней и повалы – выступы нескольких верхних бревен сруба. Также резные изображения конских голов могли располагаться на верхних концах причелин.

Образ дракона нашел множественное отражение в европейских культурах, особенно на рубеже XIX и XX вв. Интерес к народным традициям и строительству из дерева стал одной из ветвей развития европейского историзма, а впоследствии и модерна как его национально-романтического направления. В частности, образы драконов появились в Норвегии, в творчестве ряда архитекторов, работавших в романтическом направлении, которые отражали национальные особенности этой северной страны [4].

Норвежский «стиль драконов» в конце XIX – начале XX в. стал весьма распространенным явлением как в самой Норвегии, так и в северных европейских странах. Через кайзера Германии Вильгельма II, который был ярким поклонником наследия викингов и северной культуры в целом, этот стиль вошел в Германию. Немного позже это стилистическое направление распространилось в России, где архитекторы восприняли северную европейскую культуру как общую целостность сурового зимнего края приполярных широт. Архитекторы России, на почве национальной романтики, восприняли новую эстетику архитектуры Скандинавских стран – архитектуру северного модерна, как созвучную, родственную и вполне гармоничную не только Европейскому Северу России, но и условиям далекой от Европы Западной и Восточной Сибири.

Ярким представителем «стиля драконов» был его создатель – норвежец, выпускник Ганноверского университета 1877 г. архитектор Хольм Хансен Мунте (1848–1898). Его «стиль драконов» как национальная программа в эстетике зарождающегося модерна сложилась к началу 1890-х гг. Новые национально-романтические стилистические поиски были воплощены в таких наиболее известных сооружениях архитектора, как ресторан Фрогнерсетерен (рис. 1) в окрестностях г. Осло (1890–1891) и охотничий замок кайзера Вильгельма II (1890–1893) в Роминтской пуще в Восточной Пруссии под г. Кёнигсбергом (совр. г. Калининград, Россия) (рис. 2) [5].



*Рис. 1. Ресторан Фрогнерсетерен в окрестностях Осло, Норвегия. Архитектор Х.Х. Мунте, 1891 г. Фотография рубежа XIX–XX вв. (URL: <https://digitaltmuseum.no/011012602545/frognerstøen-holmenkollen-oslo>)*



Рис. 2. Охотничий замок кайзера Вильгельма II в Восточной Пруссии. Архитекторы Х.Х. Мунте, О.А. Свере, 1893 г. Фотография начала XX в. (URL: <https://www.pinterest.fr/pin/>)

Отличительной особенностью «стиля драконов» как художественного направления в искусстве и архитектуре являлось изображение стилизованной головы дракона на коньках крыш. «Стиль драконов» взял свои прообразы от кораблей воинственных викингов, которые ставили на носы своих кораблей своеобразные обереги – головы морских чудовищ – драконов. Образы драконов встречаются и в народной архитектуре Скандинавских стран как обереги для жилых домов, хранилищ, амбаров. Головы драконов защищали средневековые церкви, располагаясь на коньках крыш и порталах ставкирхок. Все эти прообразы стали источниками вдохновения норвежских зодчих, породили новые поиски национального романтизма.

В начале XX в. «стиль драконов» получил свое отражение в деревянной архитектуре России. Приведем некоторые, известные на сегодняшний день примеры. Наиболее интересные постройки находились на станции Вырица Московско-Виндаво-Рыбинской (Царскосельской) железной дороги. Здесь в начале XX в. сформировался крупный дачный поселок, были построены вокзал, станционные дома, началось строительство многочисленных дач петербуржцев. Обращают на себя внимание буфет и гостиница на станции, которые содержал предприниматель А.П. Кукушкин. Буфет и гостиница были построены предположительно в конце 1900-х гг. (рис. 3).

Не менее интересный образец «стиля драконов» находится в Томске, в Западной Сибири. Исследователи архитектуры связывают появление этого стиля в далеком от Европы крае с северным модерном. Северный модерн как архитектурное направление легло на сибирскую почву под эгидой идей сибирского областничества – общественно-политического и культурного дви-

жения среди сибирской интеллигенции, распространенного во второй половине XIX – начале XX в. Представители этого движения, а среди них такие крупные общественные деятели и ученые, как Г.Н. Потанин, Н.М. Ядринцев, добивались культурной и экономической самостоятельности Сибирского края. Распространение областнических идей способствовало развитию культуры Сибири: изучению быта и укладов, традиций и обычаев, искусства коренных народов [6]. В архитектурной среде эта тема, получившая название «сибирский стиль», привела к поиску регионального своеобразия, в том числе и на основе влияний северного модерна.

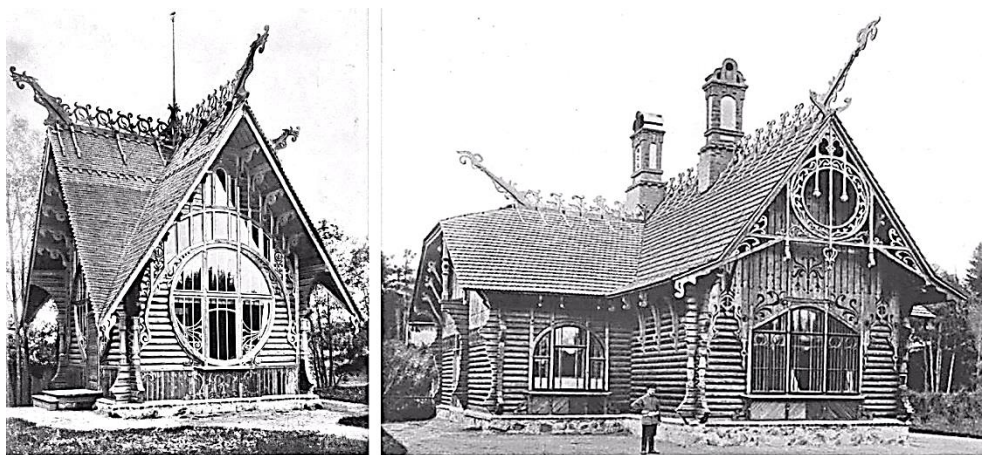


Рис. 3. Буфет и гостиница на станции Вырица Царскосельской железной дороги, принадлежавшие А.П. Кукушкину. Архитектор А.И. Владовский (?), начало XX в. Фотографии начала XX в. (URL: <https://foto-history.livejournal.com/8895772.html>)

Ярким примером «стиля драконов» в Томске является доходный дом Б.А. Быстржицкого (ул. Красноармейская, 68), построенный по проекту архитектора В.Ф. Оржешко в 1910-х гг. (рис. 4). В объемном построении, элементах и деталях этого дома присутствуют прямые мотивы Императорского охотничьего замка кайзера Вилгельма II, построенного норвежскими архитекторами Х.Х. Мунте и О.А. Свере в 1893 г. в Германии. Это практически вся наружная конструктивная основа здания в виде криволинейных выступающих «в обло» выпусков бревен. Основной деревянный декор дома также повторяет образ замка в венчающих частях фронтонов в виде голов дракона в духе норвежских средневековых церквей (головы драконов прорисованы В.Ф. Оржешко в собственной интерпретации). Весьма примечательно, что в оформлении этого здания архитектор применил обрамление наличников, которые встречаются лишь в проектом предложении Х.Х. Мунте, но не осуществлены в натуре<sup>1</sup>. Таким образом, детализация наличников охотничьего замка императора была воплощена в Томске в двух видах – в оригинальном и стилизованно проработанном.

<sup>1</sup> Dietrichson L., Munthe H. Die Holzbaukunst Norwegens. Berlin, 1893.

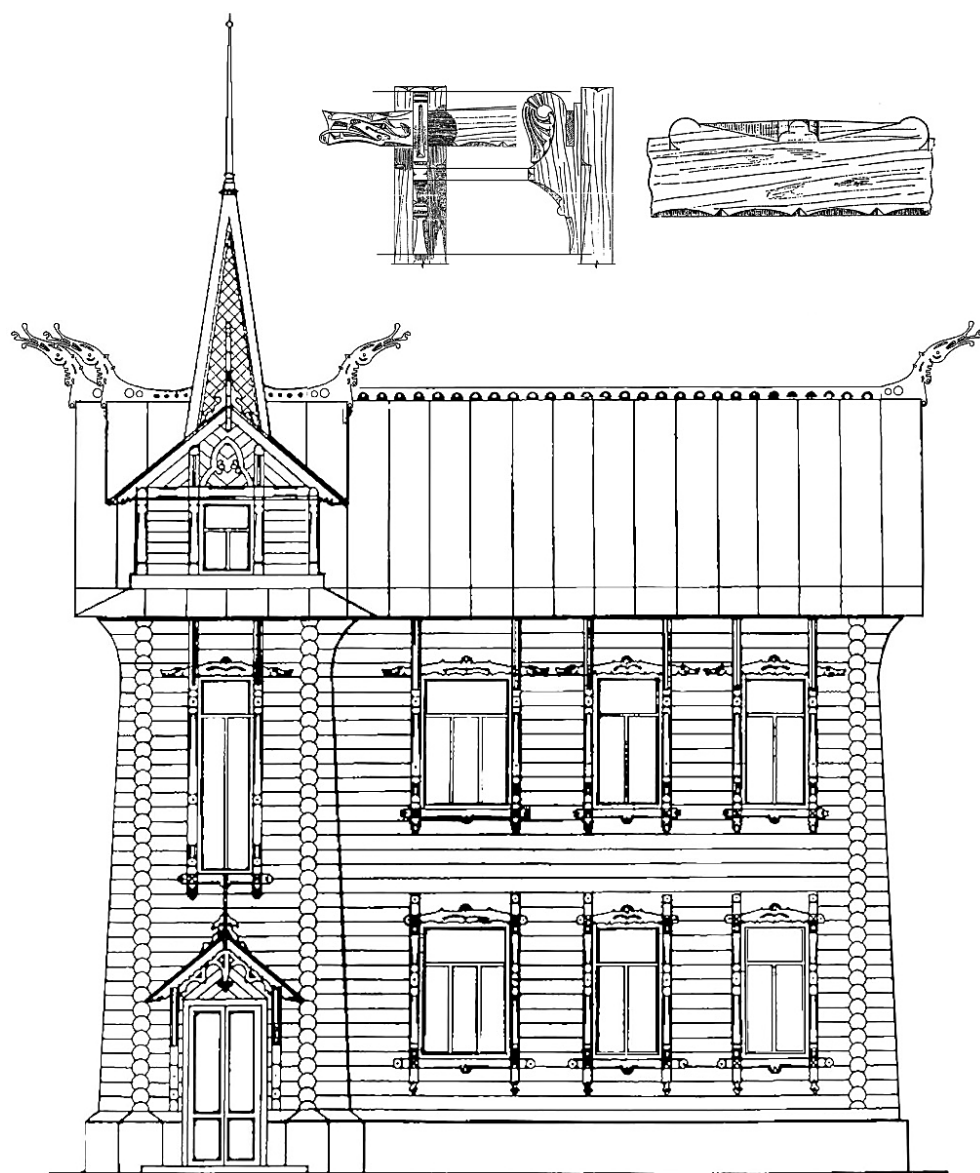


Рис. 4. Дом с драконами – доходный дом Б.А. Быстржицкого по ул. Красноармейской, 68, в Томске. Архитектор В.Ф. Оржешко (?), 1910-е гг. Фрагменты венчающей части наличника, запроектированные Х.Х. Мунте для охотничьего дома императора Вильгельма II, но не осуществленные в натуре (вверху слева)

Кроме того, фасадная композиция этого дома по ул. Красноармейской, 68, практически полностью повторяется в другом доходном доме Томска по ул. Кузнецова, 17, который принадлежал В.И. Василькову (постройка 1910-х гг.). Здесь также использовано оформление наличников по прототипу охотничьего замка, но в более стилизованном декоративном виде и без венчающих драконов (рис. 5).

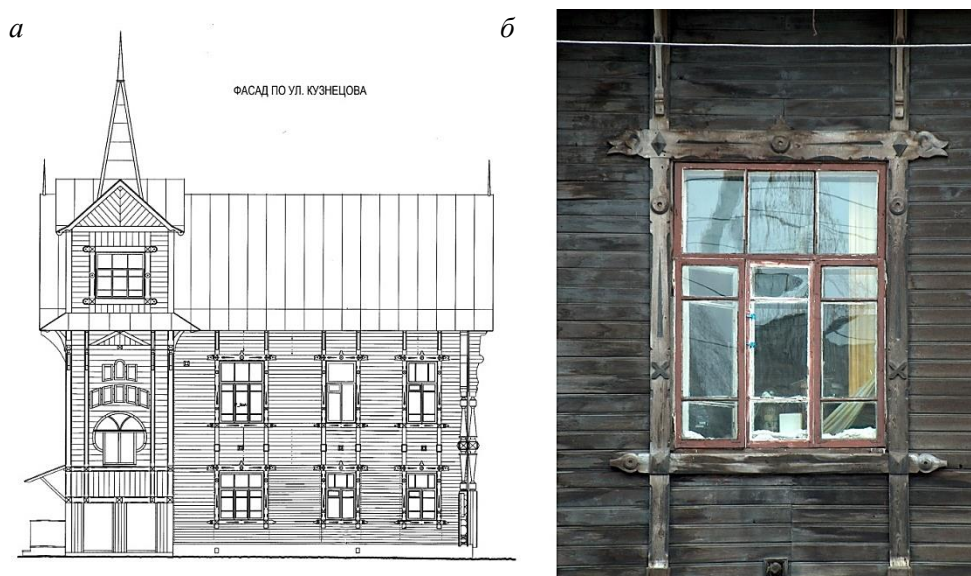


Рис. 5. Доходный дом В.И. Василькова по ул. Кузнецова, 17, в Томске (1910-е гг.):  
а – главный фасад с улицы Кузнецова; б – наличник второго этажа главного фасада

Весьма интересную находку недавно опубликовала исследователь Л.Г. Басина. Рассматривая стиль модерн в путевых постройках Кругобайкальской железной дороги в 1910-е гг., она обратила внимание на весьма интересный проект типового здания блок-поста, представленного в альбоме типовых и исполнительных чертежей по строительству дороги<sup>2</sup>. Автор оговаривает, что «несмотря на то, что нам не известно, было ли возведено здание блок-поста, наличие проекта и гребней в виде драконьих голов достаточно, чтобы понять, чем вдохновлялись архитекторы, разрабатывающие проекты путевых построек» [7]. Л.Г. Басина напрямую связывает стиль проектных чертежей альбома с работами Х.Х. Мунте и «домом с драконами» в Томске. Отмечаются изгибающиеся сочленения бревен в местах конструктивных врубок, наличники путевых построек, а также завершающий элемент фронтонов в виде головы дракона (рис. 6).

К «стилю драконов» также возможно причислить деревянный дом, выстроенный в начале XX в. в Омске (совр. ул. Мичурина, 48). Стилизованные изображения дракона читаются в кронштейнах входного навеса, а также навершиях оконных наличников. Однако данный пример принадлежит скорее к восточному дракону и не связан с норвежской архитектурой (рис. 7).

Таким образом, «стиль драконов», зародившийся в архитектуре Норвегии в русле национально-романтических тенденций, нашел свое отражение в начале XX в. в Российской империи. Все вышеописанные проекты и постройки, их архитектурные образы имеют яркую романтическую окраску в духе «стиля драконов».

<sup>2</sup> Альбом типовых и исполнительных чертежей по постройке второго пути на участке Байкал – Култук – Танхой Забайкальской железной дороги 1911–1915 гг. Иркутск, 1916. С. 93.



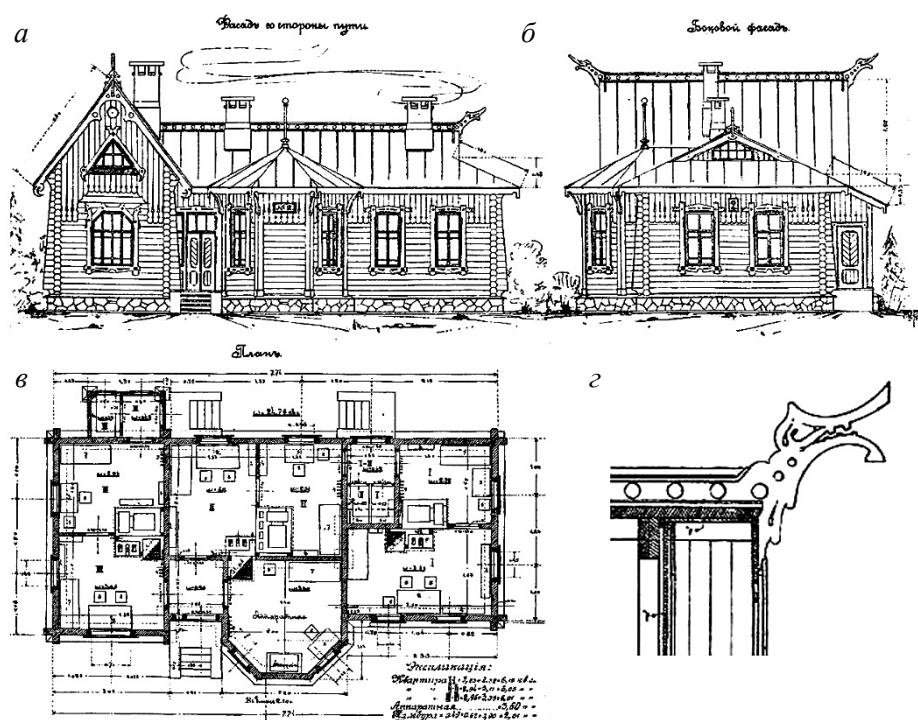


Рис. 6. Проект типового здания блок-поста для Кругобайкальской железной дороги (Альбом типовых и исполнительных чертежей по постройке второго пути на участке Байкал – Култук – Танхой Забайкальской железной дороги 1911–1915 гг. Иркутск, 1916. С. 93):

а – главный фасад; б – боковой фасад; в – план; г – фрагмент оформления коньков крыш в виде изображения головы дракона

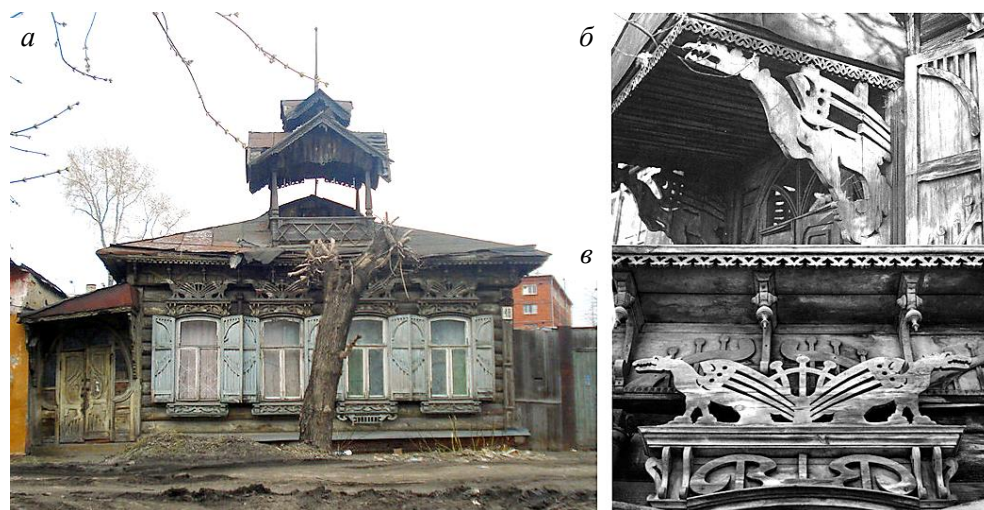


Рис. 7. Жилой дом по ул. Мичурина, 48, в Омске (1910-е гг.):

а – общий вид с улицы Мичурина; б – кронштейн входного навеса уличного входа; в – наверхие наличника окна главного фасада



Проявление этого направления в отдаленной части России, каковой являлась Сибирь, свидетельствует о том, что местные архитекторы достаточно своевременно чувствовали современные стилистические изменения и активно вводили в свою практику эксперименты в духе поиска регионального своеобразия, особенно в дереве.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курина, Н.Н. Искусство эпохи викингов и портал в Урнесе (1060–1080) // Вестник Вятского государственного гуманитарного университета. 2014. № 12. С. 172–177.
2. Поляков Е.Н., Кочерыгина К.Б. Образ священного дракона в искусстве Древнего Китая // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2009. № 2. С. 22–39.
3. Крюкова Г.М. Образ дракона в диалоге культур // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 5 (64). С. 324–331.
4. Лисовский В.Г. Северный модерн: Национально-романтическое направление в архитектуре стран Балтийского моря на рубеже XIX и XX веков. НИИТИАГ. Санкт-Петербург : Коло, 2016. С. 219–233.
5. Белинцева И.В. Памятник норвежского «стиля драконов» в Калининграде. История появления и современное состояние // Деревянное зодчество. Вып. 3. Новые материалы и открытия. Санкт-Петербург : Коло, 2013. С. 296–313.
6. Муратов П.Д. Изобразительное искусство Томска. Новосибирск, 1974. 80 с.
7. Басина Л.Г. Модерн в путевых постройках Кругобайкальской железной дороги периода строительства второго пути (1912–1915 гг.) // Известия Архитектурно-этнографического музея «Тальцы». Вып. 10. Иркутск, 2019. С. 121–135.

## REFERENCES

1. Kurina N.N. Iskusstvo epohi vikingov i portal v Urnese (1060–1080) [Viking Age Art and Portal in Urnes (1060–1080)]. *Vestnik Vyatskogo gosudarstvennogo humanitarnogo universiteta*. 2014. No. 12. Pp. 172–177. (rus)
2. Polyakov E.N., Kocherygina K.B. Obraz svyashchennogo drakona v iskusstve Drevnego Kitaya [Image of the sacred dragon in the art of Ancient China]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and building*. 2009. No. 2. Pp. 22–39. (rus)
3. Kryukova G.M. Obraz drakona v dialogue kul'tur [Dragestil in the dialogue of cultures]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2012. No. 5 (64 ). Pp. 324–331. (rus)
4. Lisovskij V.G. Severnyj modern: Nacional'no-romanticheskoe napravlenie v arhitekture stran Baltijskogo morya na rubezhe XIX i XX vekov [Northern Art Nouveau: National romantic style in architecture of the Baltic sea countries at the turn of the 19th and 20th centuries]. NIITIAG. Saint-Petersburg: Kolo, 2016. Pp. 219–233. (rus)
5. Belinceva I.V. Pamyatnik norvezhskogo «stilya drakonov» v Kaliningrade. Istoriya poyavleniya i sovremennoe sostoyanie [Monument of the Norwegian dragestil in Kaliningrad. The history of emergence and current status]. In: Derevyannoe zodchestvo. Iss. 3. Novye materialy i otkrytiya. Saint-Petersburg: Kolo, 2013. Pp. 296–313.
6. Muratov P.D. Izobrazitel'noe iskusstvo Tomsk [Fine art of Tomsk]. Novosibirsk, 1974. 80 p. (rus)
7. Basina L.G. Modern v putevyh postrojках Krugobajkal'skoj zheleznoj dorogi perioda stroitel'stva vtorogo puti (1912–1915 gg.) [Modern style of the Circum-Baikal Railway during the construction period of the second track (1912–1915)]. *Izvestiya Arhitekturno-etnograficheskogo muzeya "Tal'cy"*, Iss. 10. Irkutsk, 2019. Pp. 121–135. (rus)

## Сведения об авторах

Залесова Полина Валерьевна, магистр архитектуры, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, grotesque-polina@gmail.com

*Манонина Татьяна Николаевна*, канд. ист. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, manonina100@yandex.ru

*Васина Нина Валентиновна*, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sava5358@yandex.ru

#### **Authors Details**

*Polyna V. Zalesova*, MSc, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., Tomsk, 634034, Russia, grotesquepolina@gmail.com

*Tatiana N. Manonina*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., Tomsk, 634034, Russia, manonina100@yandex.ru

*Nina V. Vasina*, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., Tomsk, 634034, Russia, sava5358@yandex.ru

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101

*А.В. ПЕРЕЛЬМУТЕР,  
НПО SCAD Soft*

## ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ

Приведен краткий обзор основных идей обширного класса обратных задач строительной механики, относящихся к проблемам идентификации расчетных моделей, мониторинга технического состояния и поиску повреждений. Указывается на некорректность обратных задач, численная реализация которых в связи с этим требует регуляризации. Приведены ссылки на работы, где указываются случаи практического применения решений задач такого рода.

**Ключевые слова:** расчетная схема; частоты и формы собственных колебаний; идентификация; мониторинг.

**Для цитирования:** Перельмутер А.В. Обратные задачи строительной механики // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 4. С. 83–101.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101

*A.V. PERELMUTER,  
SCAD Soft, Ltd.*

## INVERSE PROBLEMS OF STRUCTURAL MECHANICS

The paper presents a brief review of the main ideas on the extensive class of inverse problems in structural mechanics relating to the identification of design models, technical condition monitoring and finding damages. The numerical implementation of identified incorrectness of inverse problems requires regularization. References include works describing the cases of practical application of reverse problem solutions.

**Keywords:** calculation model; frequency; eigenfrequency; oscillations; identification; monitoring.

**For citation:** Perelmuter A.V. Obratnye zadachi stroitel'noi mekhaniki [Inverse problems of structural mechanics]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 4. Pp. 83–101.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101

### Введение

Основным инструментом исследований в строительной механике является работа с расчетной схемой сооружения, иными словами – с его математической моделью.

Традиционно выделяют два основных класса задач, связанных с математическими моделями: прямые и обратные. Определяющими критериями здесь является соотношение «причина-следствие», а также наблюдаемость или ненаблюдаемость искомых параметров в физическом эксперименте (разрешимость или неразрешимость в численном эксперименте). Тогда под прямой задачей понимают прогнозирование последствий каких-либо действий, а под обратной задачей понимают задачу выяснения причин появления этих последствий. Полезно отметить, что термины «причины» и «следствия» следует понимать в общих чертах, они уточняются в каждом конкретном случае<sup>1</sup>.

На рис. 1, *а* показано определение прямых задач: выходной сигнал может быть рассчитан, когда входной сигнал известен и система полностью определена. С другой стороны, существуют разные обратные задачи, которые могут быть определены таким же синтетическим способом. На рис. 1, *б* и *в* представлены два разных вида таких задач: первый – это так называемое восстановление входа, т. е. известен один выход, и система находит соответствующий вход; второй представляет собой оценку параметров системы, т. е. известны один или несколько входных данных, и соответствующий один или несколько выходных данных находят подходящую оценку неизвестных параметров.

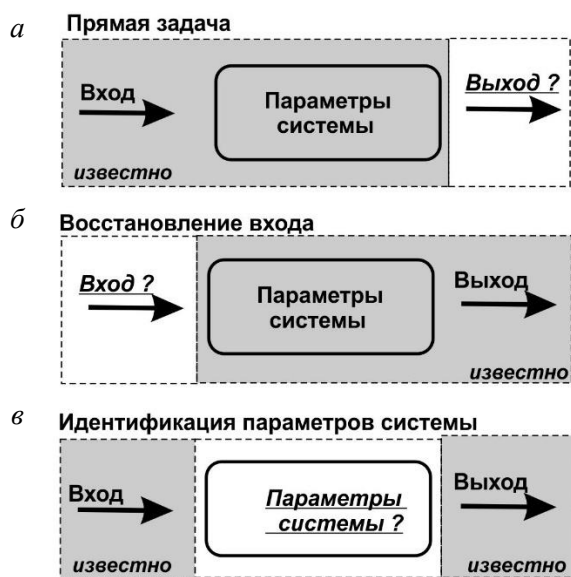


Рис. 1. Схематическое представление задач

<sup>1</sup> Уинстон Черчилль говорил: «Политик должен уметь предсказать, что произойдет завтра, через неделю, через месяц и через год. А потом объяснить, почему это не произошло» – типичное описание прямой и обратной задачи.

Обратная задача часто не имеет единственного решения, и ее условия может удовлетворять целое множество значений разыскиваемых параметров. Чтобы выбрать определенное решение из множества возможных, используется некоторая дополнительная информация. Дополнительная информация может состоять в дополнительных данных о компонентах решения, найденных экспериментально (задачи идентификации), или о некоторых желательных свойствах конструкции (задачи проектирования).

В случаях задачи проектирования условия обратной задачи часто определяются требованием выбора наилучшего в некотором смысле варианта решения, и возникает задача оптимального проектирования. Обычно отыскивается решение, оптимальное с точки зрения расхода материала или с другим экономическим показателем. Но в обратной задаче не обязательно исходят из условия оптимальности, здесь для поиска искомых параметров часто используют условия принадлежности к некоторому классу систем с определенными желательными свойствами (равнопрочность, постоянство распределения по системе упругой удельной деформации, требование о принадлежности частот собственных колебаний некоторому желательному диапазону или др.), в том числе свойствами, присущими оптимальному решению [1].

Задачам оптимального проектирования посвящено огромное количество работ, в том числе и опубликованных на страницах настоящего сборника. Они заслуживают отдельного рассмотрения и не будут здесь рассматриваться, а основное внимание мы уделим задачам идентификации, которые связаны с проблемами мониторинга и диагностики механического состояния конструкций.

Впервые проблема идентификации возникла в теории автоматического управления (см., например, [2]), когда по отдельным измерениям объекта определялись его свойства, необходимые для достижения некоторого заданного качества управления.

В строительной механике первые работы, посвященные проблеме идентификации, появились в конце шестидесятих годов XX столетия и относились они к объектам аэрокосмической техники [3, 4]. Предметом исследования в этих работах были колебания линейных динамических систем с демпфированием. После этого идентификация системы была применена к различным инженерным задачам строительной механики.

### **Идентификация и обновление расчетной схемы**

При построении конечно-элементных моделей обычно делают упрощающие предположения. Граничные условия и условия соединения между конструктивными компонентами (болтовые соединения, сварные швы, посадка пресса и т. д.) редко моделируются точно. Возникает необходимость в проверке расчетной модели, и в особо ответственных случаях выполняется экспериментальная проверка расчета и обновление модели. Целью такого обновления является изменение ее параметров, чтобы получить лучшее согласие между числовыми результатами и данными испытаний.

#### *Прямые методы*

Одним из простейших и наиболее распространенных является подход, основанный на предположении о том, что одна из трех основных матриц ко-

нечно-элементной модели сооружения (матрицы масс, жесткости, демпфирования) является известной.

Одной из первых решалась параметрическая задача, в которой предполагалось, что матрица масс известна точно, а уточняются только матрицы жесткости и демпфирования [5]. Разница между исходной и обновленной матрицами демпфирования и жесткости минимизировалась с учетом ограничений, которые в стиле метода штрафных функций следили за тем, чтобы выполнялись уравнения динамического равновесия и чтобы матрицы демпфирования и жесткости были симметричными (и конечно, действительными). Тогда функция, которая должна быть минимизирована, определяется как

$$J = \frac{1}{2} \|N^{-1}(K - K_0)N^{-1}\|^2 + \frac{1}{2} \mu \|N^{-1}(C - C_0)N^{-1}\|^2 \quad (1)$$

при условии

$$\begin{aligned} M_0 \Phi \Lambda^2 + C \Phi \Lambda + K \Phi &= 0, \\ C &= C^T, \quad K = K^T, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $N = M_0^{1/2}$ ,  $M_0$ ,  $C_0$  и  $K_0$  – исходные матрицы массы, демпфирования и жесткости аналитической модели;  $C$  и  $K$  – обновленные матрицы демпфирования и жесткости;  $\Phi$  и  $\Lambda$  – измеренные матрицы собственных векторов и собственных значений. Матрица  $N$  выполняет роль весовой функции, с помощью которой сопоставляются различные компоненты матриц невязки  $(K - K_0)$  и  $(C - C_0)$ . Возможно использование и других весовых матриц, в том числе и различных для матриц демпфирования и жесткости. Если существует полный набор форм колебаний, то  $\Phi$  не является квадратной и модель должна быть уменьшена. Роль параметра  $\mu$  в формуле (1) состоит в том, чтобы уравновесить ошибки матриц демпфирования и жесткости.

Важной особенностью задач идентификации была ориентация на данные измерений как на эталонную основу решения [6]. Был предложен метод последовательного решения, когда на первом этапе минимизировали целевую функцию

$$J_M = \|M_A^{-1/2}(M - M_A)M_A^{-1/2}\| + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \mu_{ij} (\Phi^T M \Phi - I)_{ij}, \quad (3)$$

где  $\mu_{ij}$  – множитель Лагранжа, используемый для обеспечения условий ортогональности векторов относительно обновленных масс. Процедура минимизации приводит к выражению для обновленной массы

$$M = M_A + M_A \Phi m_A^{-1} (I - m_A) m_A^{-1} \Phi^T M_A, \quad (4)$$

где

$$m_A = \Phi^T M_A \Phi, \quad (5)$$

а  $\Phi$  – неполная модальная  $p \times m$  матрица ( $m < p$ ),  $p$  – порядок аналитической и обновленной моделей.

После вычисления  $M$  из уравнения (4) можно определить обновленный массив жесткости путем минимизации дополнительной целевой функции

$$J_K = \|M_A^{-1/2} (K - K_A) M_A^{-1/2}\| + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \mu_{Kij} (K\Phi - M\Phi\Lambda)_{ij} + \\ + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \mu_{Qij} (\Phi^T K\Phi - M\Phi\Lambda)_{ij} + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^i \mu_{Sij} (K - K^T)_{ij}, \quad (6)$$

где  $\Lambda$  представляет спектральную матрицу. Здесь множители Лагранжа используются для обеспечения соблюдения уравнений движения, ортогональности и симметрии жесткости. Уравнения обновления матрицы жесткости можно записать в виде

$$K = K_A + (\Delta + \Delta^T), \quad (7)$$

где 
$$\Delta = \frac{1}{2} M\Phi (\Phi^T K_A \Phi + \Lambda) \Phi^T M - K_A \Phi \Phi^T M. \quad (8)$$

Следует отметить, что хотя  $M^{-1/2}$  присутствует в целевых функциях (3) и (6), его вычисление не требуется, поскольку оно отсутствует в уравнениях обновления (4) и (7).

В процедуре обновления могут использоваться как собственные частоты, так и собственные формы. До недавнего времени собственные формы обычно не использовались, поскольку они часто содержат ошибки измерений, достигающие 20 %. Напротив, собственные частоты могут быть измерены с гораздо большей точностью, чем 1 %, и могут использоваться с уверенностью.

Положение резко изменилось после того, как был предложен построенный на основе принципа восстановления когерентных составляющих волновых полей метод стоячих волн, разработанный коллективом Сибирского отделения РАН под руководством д.т.н. А.Ф. Еманова. Выделение из беспорядочных движений системы, которая подвержена действию микросейсмических стоячих волн (форм собственных колебаний), позволяет найти их в необходимом количестве и с достаточной точностью [7], что с успехом было проверено на практике [8, 9].

#### Методы обновления на основе чувствительности

При использовании прямых методов матрицы метода конечных элементов (массы, жесткости, демпфирования) модифицируются или обновляются полностью. Но представляют интерес и локальные методы обновления, основанные на поправках, применяемых к локальным физическим параметрам моделей, имеющие физическое значение. Эффективные и наиболее популярные локальные методы обновления моделей обычно основаны на анализе чувствительности. При формулировании модификации параметров в моделях МКЭ «истинные» (или экспериментальные) отклики, такие как частоты или формы собственных колебаний, выражаются как функции аналитических откликов  $r$  и структурных параметров  $p$  с помощью матрицы коэффициентов чувствительности  $S$ .

Если отличия расчетных и экспериментальных значений не слишком велики, то можно использовать линейное приближение

$$r_a = r_e + S(p_u - p_e) \quad (9)$$

или

$$\Delta r = S \Delta p, \quad (10)$$

где  $\Delta r = r_a - r_e$ ,  $r_a$  и  $r_e$  – соответственно векторы экспериментальных и аналитических значений отклика системы;  $\Delta p = p_a - p_e$ ,  $p_a$  и  $p_e$  – соответственно векторы обновленных и текущих значений корректируемых параметров системы.

Для всех выбранных ответов и параметров элементы матрицы чувствительности  $S$  могут быть рассчитаны следующим образом:

$$s_{ij} = \partial r_i / \partial p_j, \quad (11)$$

где  $r_i$  и  $p_j$  представляют структурный ответ и параметр соответственно, а индексы принимают значения  $i = 1 \dots n$  для  $n$  ответов и  $j = 1 \dots m$  для  $m$  параметров.

Матрица чувствительности может быть вычислена для всех физических свойств элемента (материала, геометрического, граничного и т. д.) аналитически или путем анализа численных возмущений.

Уравнение (10) может быть определено, переопределено или недоопределено в зависимости от того, число ответов  $n$  равно, больше или меньше количества параметров  $m$ . В любом случае параметр модификации  $\Delta p$  в уравнении (10) может быть найден с помощью техники псевдообращения

$$\Delta p = S^+ \Delta r, \quad (12)$$

где  $S^+$  является псевдообратной матрицей Мура – Пенроуза, которая определяется как [10]

$$S^+ = \begin{cases} S^{-1} & \text{если } N = M, \\ (S^T S)^{-1} S^T & \text{если } N > M, \\ S^T (S S^T)^{-1} & \text{если } N < M. \end{cases} \quad (13)$$

Поскольку в представлении (9) мы пренебрегли членами более высокого порядка, чем линейный, возможно, потребуется несколько итераций, особенно когда  $\Delta r$  содержит большие значения. Следует отметить, что при наличии слишком больших расхождений между экспериментальной и аналитической моделями итерационный процесс может расходиться.

Если предполагается, что неточность МКЭ-модели связана с моделированием в ограниченных областях конструкции, таких, например, как стыковые соединения в узлах системы, то целесообразно использование специальных расчетных моделей (в работах [11, 12] они названы адаптивными). Для количественного представления указанных зон в модель можно включить некоторые специальные детали типа «слабых» элементов, параметры которых будут обновляться. На рис. 2 показана такая модель зоны сопряжения элементов.

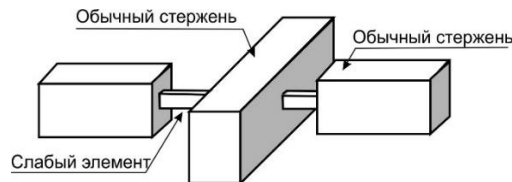


Рис. 2. Прием моделирования



Распространенной проблемой при настройке модели МКЭ является определение граничных условий. Удачным приемом здесь является использование опорных пружин. Значения их упругой жесткости после обновления будут приближаться к реальным граничным условиям.

### *Регуляризация*

Рассмотрение плохо обусловленных, зашумленных систем уравнений является центральной проблемой для задач обновления модели конечных элементов [14]. Такие уравнения часто возникают при коррекции моделей конечных элементов с помощью измерений вибрации. Акцент обычно делается на уменьшении количества параметров, чтобы гарантировать, что уравнения хорошо обусловлены. Тем не менее правильная обработка данных с «шумом» важна. Кроме того, уменьшение количества параметров иногда невозможно или нежелательно.

При обновлении модели соотношение между измеренным выходом обычно является нелинейным. В этом случае задача линеаризуется с использованием разложения в ряд Тейлора и выполнения итерации до сходимости. На каждой итерации должен быть решен набор линейных уравнений типа  $Ax = b$  для неизвестного вектора  $x$ , связанного с параметрами. Когда матрица коэффициентов близка к вырождению, даже небольшие уровни «шума» могут привести к значительному отклонению оценочных параметров от ее «точного» значения. Решение называется неустойчивым, а проблема оценки плохо обусловлена. Для преодоления упомянутых сложностей часто используется регуляризация по Тихонову [15, 16].

Методы идентификации систем на основе обновления моделей не могут быть эффективно использованы для больших и сложных реальных структур с нелинейным поведением. Для таких случаев используются основанные на принципах бионики методы мягкого исчисления, такие как нейронные сети, генетические алгоритмы или оптимизация роем частиц.

### **Поиск повреждений и мониторинг**

Обнаружение повреждения или повреждение, определяемое изменениями динамических свойств или откликом конструкций, является предметом, которому уделяется значительное внимание в литературе. Основная идея заключается в том, что модальные параметры (в частности, частоты, формы мод и модальное демпфирование) являются функциями физических свойств конструкции (масса, демпфирование и жесткость). Следовательно, изменения физических свойств вызовут изменения модальных свойств.

### *Сопоставление частот и форм собственных колебаний*

В связи с этим возникла идея о поиске повреждений конструкции на основе исследования изменения ее динамических характеристик. Рассматривался сдвиг частот расчетной (аналитической) модели, когда фиксировалась отнесительная разность

$$\left( \omega_i^a - \omega_i^e \right) / \omega_i^e \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (14)$$

где  $\omega^a$  и  $\omega^e$  – аналитические и экспериментальные частоты собственных колебаний соответственно;  $N$  – количество измеренных частот.

Довольно рано было обнаружено, что изменения в формах собственных колебаний являются более чувствительными показателями наличия повреждений, чем собственные частоты [17].

Многие исследователи в качестве руководства для обнаружения повреждений использовали формы собственных колебаний до и после повреждения конструкции. Для их сопоставления чаще всего применялся критерий модальной гарантии (МАС) и координатный критерий модальной гарантии (СОМАС).

МАС оценивает корреляции измеренных и расчетных форм собственных колебаний. Он определяется следующим образом [13]:

$$\text{MAC}(\varphi_a, \varphi_e) = \frac{|\varphi_a^T, \varphi_e|^2}{(\varphi_a^T, \varphi_a)(\varphi_e^T, \varphi_e)}, \quad (15)$$

где  $\varphi_a$  и  $\varphi_e$  – аналитические и экспериментальные векторы форм собственных колебаний соответственно.

Если значение МАС равно 1, то между собственным вектором аналитической модели и измеренным вектором имеется полная согласованность, а нулевое значение МАС указывает на абсолютную несогласованность.

Другим известным методом сравнения и сопоставления двух наборов ( $A$  и  $B$ ) форм вибрационных мод является СОМАС. Отличие этого критерия состоит в том, что рассматриваются значения собственных форм только в точках измерения. Если  $i$  – это место измерения,  $N$  – общее количество сравниваемых форм собственных колебаний, а  $i\varphi_{A,j}$  и  $i\varphi_{B,j}$  – элементы вектора форм собственных колебаний для наборов  $A$  и  $B$  в  $j$ -й сравниваемой паре форм, то СОМАС для места измерения  $i$  определяется следующим образом:

$$\text{COMAC}(i) = \frac{\left[ \sum_{j=1}^N i\varphi_{A,j} \cdot i\varphi_{B,j} \right]^2}{\sum_{j=1}^N i\varphi_{A,j}^2 \sum_{j=1}^N i\varphi_{B,j}^2}. \quad (16)$$

Значение СОМАС, близкое к единице, указывает на хорошее согласование в выбранном месте между двумя наборами данных, а значение, близкое к нулю, указывает на несогласованность этих наборов данных.

В некоторых случаях используется комбинированная характеристика согласованности, которая выражается формулой

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i \left( \frac{\omega_i^a - \omega_i^e}{\omega_i^e} \right)^2 + \sum_{i=1}^N \beta_i \frac{(1 - \text{MAC}_i)^2}{\text{MAC}_i}. \quad (17)$$

Здесь  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  обозначают весовые коэффициенты для  $i$ -й собственной частоты и  $i$ -го модального вектора соответственно, с помощью которых учитывается значимость и доверие к точности используемых данных.

## Обновление матриц

Другой класс методов идентификации повреждений основан на модификации матриц расчетных моделей для максимально точного воспроизведения измеренного статического или динамического отклика данных. Эти методы решают проблемы для обновленных матриц (или возмущений номинальной модели, которые производят обновленные матрицы) путем формирования ограниченной задачи оптимизации на основе уравнений движения номинальной модели и измеренных данных.

Существует несколько различных физических уравнений, которые используются в качестве целевых функций или ограничений для задачи обновления матрицы, в зависимости от алгоритма обновления. Предполагается известным динамическое поведение неповрежденной конструкции, которое может быть представлено уравнениями, имеющими в матричной форме вид

$$M^u \ddot{x} + C^u \dot{x} + K^u x = f(t). \quad (18)$$

Для собственных значений, соответствующих этому уравнению, выполняется условие

$$\left( (\lambda_i^u)^2 M^u + \lambda_i^u C^u + K^u \right) \phi_i^u = 0, \quad (19)$$

где  $\lambda_i^u$  и  $\phi_i^u$  – это известное или измеренное собственное значение и собственный вектор неповрежденной конструкции. Предполагается, что это уравнение должно выполняться для всех измеренных форм собственных колебаний.

Теперь рассмотрим собственные значения и собственные векторы, соответствующие поврежденному состоянию  $\lambda_i^d$  и  $\phi_i^d$ . Подстановка этих величин в приведенное выше уравнение дает

$$\left( (\lambda_i^d)^2 M^u + \lambda_i^d C + K \right) \phi_i^u = d, \quad (20)$$

где  $d$  определяется как «остаточная сила» для  $i$ -й формы собственных колебаний поврежденной конструкции. Этот вектор представляет собой силу, меняющуюся по гармоническому закону, которая должна быть приложена к поврежденной конструкции, описываемой матрицами  $M^d$ ,  $C^d$ ,  $K^d$  на измеренной частоте  $\lambda_i^d$ , чтобы структура отвечала наблюдаемой форме собственных колебаний  $\phi_i^d$ .

Есть несколько методов, которые были использованы для вычисления аналитических модельных матриц поврежденной структуры  $M^d$ ,  $C^d$ ,  $K^d$  так, чтобы полученное уравнение движения было сбалансированным, т. е. выполнялось условие

$$\left( (\lambda_i^d)^2 M^d + \lambda_i^d C^d + K^d \right) \phi_i^u = 0, \quad (21)$$

где матрицы поврежденной модели определяются как матрицы неповрежденной модели минус возмущение

$$M^d = M^u - \Delta M, \quad C^d = C^u - \Delta C, \quad K^d = K^u - \Delta K. \quad (22)$$

Подставляя (22) в уравнение (21), получаем

$$\left( (\lambda_i^d)^2 (M^u - \Delta M) + \lambda_i^d (C^u - \Delta C) + (K^u - \Delta K) \right) \varphi_i^u = 0 \quad (23)$$

и, перенося члены возмущения в правую часть уравнения, приходим к уравнению

$$\left( (\lambda_i^d)^2 M^u + (\lambda_i^d) C^u + K^u \right) \varphi_i^d = \left( (\lambda_i^d)^2 \Delta M + (\lambda_i^d) \Delta C + \Delta K \right) \varphi_i^d. \quad (24)$$

Левая часть этого уравнения состоит из известных величин и ранее была определена как остаточная сила, поэтому уравнение, которое необходимо решить для возмущений матрицы, можно записать в виде

$$\left( (\lambda_i^d)^2 \Delta M + (\lambda_i^d) \Delta C + \Delta K \right) \varphi_i^d = d_i. \quad (25)$$

Ошибка модальной силы  $d_i$  может использоваться как целевая функция при решении задачи

$$\min_{\Delta M, \Delta C, \Delta K} \{ d_i (\Delta M, \Delta C, \Delta K) + \mu R(\Delta M, \Delta C, \Delta K) \}, \quad (26)$$

где  $R$  – функция ограничений, а  $\mu$  – множитель Лагранжа или константа штрафной функции.

В качестве альтернативы иногда используются оценки ошибок, построенные на сопоставлении форм собственных колебаний, когда ошибка вывода для модального отклика конструкции определяется следующим образом:

$$e_i(x) = \varphi_i - \hat{\varphi}_i \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad (27)$$

где  $x$  – вектор системных параметров;  $\varphi_i$  – вычисленный вектор  $i$ -й формы собственных колебаний;  $\hat{\varphi}_i$  – измеренный вектор  $i$ -й формы собственных колебаний и  $m$  – количество измеренных форм соответственно.

Неизвестные параметры получаются путем минимизации целевой функции, сформулированной выходным вектором ошибок, определяемым уравнением (27). Следовательно, оценка параметров становится нелинейной задачей оптимизации с ограничениями типа

$$\min_x \Pi(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \alpha_i \|\varphi_i - \hat{\varphi}_i\|^2 \quad \text{при условии } R(x) \geq 0, \quad (28)$$

где  $R(x)$  – верхние или нижние ограничения на значения системных параметров, а  $\alpha_i$  – весовой коэффициент для  $i$ -й формы. Чтобы решить задачу оптимизации, выраженную формулой (28), используется рекурсивное квадратичное программирование, для чего требуется знать чувствительность функции ошибок для параметров системы. Она определяется формулой

$$\Pi_{,x} = \sum_{i=1}^m \alpha_i \|\varphi_i - \hat{\varphi}_i\| \varphi_{i,x}, \quad (29)$$

где нижний индекс  $(\cdot)_x$  обозначает частную производную по системному параметру  $x$ . Когда вектор формы собственных колебаний нормализуется по матрице масс, матрица чувствительности вектора выглядит следующим образом:

$$\varphi_{j,x} = - \sum_{i=1}^m \frac{\varphi_i^T K_{i,x} \varphi_j}{(\lambda_i - \lambda_j) \varphi_i^T M \varphi_j} \varphi_i \quad (i \neq j), \quad (30)$$

где  $\lambda$ ,  $M$  и  $K_x$  соответственно обозначают собственное значение, матрицу масс и матрицу чувствительности матрицы жесткости конструкции по отношению к параметру системы.

Однако в случаях, когда собственные формы измеряются лишь частично, мы не можем использовать чувствительность, приведенную в (30), с нормализацией по матрице масс. Если же предположим, что  $\varphi$  нормализуется произвольной матрицей  $C$ , то можно выразить ее чувствительность  $\bar{\varphi}_{j,x}$  следующим образом:

$$\bar{\varphi}_{j,x} = \frac{1}{\varphi_i^T C \varphi_i} \left( \varphi_{j,x} \sqrt{\varphi_i^T C \varphi_i} - \varphi_j \frac{\varphi_i^T C \varphi_{i,x}}{\sqrt{\varphi_i^T C \varphi_i}} \right). \quad (31)$$

Если заменить  $\sqrt{\varphi_i^T C \varphi_i}$  на  $m_c$ , то уравнение (31) можно представить в следующем виде:

$$\bar{\varphi}_{j,x} = \frac{1}{m_c} \varphi_{i,x} - \frac{1}{m_c^3} (\varphi_i^T C \varphi_{i,x}) \varphi_i. \quad (32)$$

Задача минимизации (28) является плохо обусловленной. Это означает, что результаты ее решения могут быть бессмысленными или расходиться в процессе оптимизации. Для преодоления такой неустойчивости используется метод регуляризации, когда возможное пространство решений задачи сужается путем добавления к целевой функции регуляризующей добавки. В частности, одним из часто используемых является регуляризатор

$$\Pi_R = \frac{\beta}{2} \|K(x) - K(x_0)\|_F^2, \quad (33)$$

где  $\beta$  и  $x_0$  обозначают коэффициент регуляризации и системные параметры, представляющие базовые свойства структуры, соответственно, а  $\|\cdot\|_F^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |a_{ij}|^2$  –

квадрат нормы Фробениуса  $n \times m$  матрицы  $A$ . Тогда задача идентификации регуляризованной системы определяется следующим образом:

$$\min_x \Pi(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \alpha_i \|\varphi_i - \hat{\varphi}_i\|^2 + \frac{\beta}{2} \|K(x) - K(x_0)\|_F^2 \quad \text{при условии } R(x) \geq 0. \quad (34)$$

### Практическое применение

Имеются многочисленные сообщения о применении методов обновления расчетных моделей и идентификации повреждений. Упомянутые ниже

примеры служат только иллюстрацией разнообразия практических проблем, где возникает необходимость использования этих методов.

Наиболее активное применение методов идентификации и поиска повреждений первоначально наблюдалось в аэрокосмической технике. В том числе это касалось и практических применений упомянутых методов, которое сегодня попросту стало элементом технологии. Так, авторы работы [18] описывают разработку и внедрение модульной инспекционной системы космического челнока «шаттл». Проведение модальных испытаний образцов орбитального аппарата использовалось для выявления повреждений передней кромки крыла, щитка кузова, передней, средней и задней панелей фюзеляжа. В статье обсуждаются результаты этих испытаний образцов, а также испытания на полной конструкции орбитального аппарата. А в работе [19] описано определение местонахождения повреждения в стрингере несущей конструкции самолета DC-9.

Публикации об идентификации объектов гражданского строительства представлены, главным образом, описаниями работ конструкций многоэтажных зданий и мостов. Так, например, в работе [20] представлены подробные сведения об идентификации и моделировании методом конечных элементов 18-этажного здания из железобетона в Катманду, которое было повреждено во время землетрясения в Горхе в Непале.

Рассматривались и другие типы конструкций, например, в исследовании [21] успешно определили модальные параметры телевизионной башни в Нанкине, используя измеренную реакцию на ускорения окружающей среды (микросейсмы). А в [22] описан процесс динамической идентификации колокольни собора в Палермо, начиная с измерения отклика высокочувствительных сейсмометров и анализа ответных сигналов, проведенной на основе этих измерений основных модальных форм.

Мосты имеют специфические проблемы, которые не существуют в конструкциях здания, такие как нагрузка транспортного средства или пешехода (транспортными средствами или пешеходами), в дополнение к ветровой и сейсмической нагрузке. Загрузка транспортного средства добавляет трудности в точном моделировании моста в отношении усталости из-за многократной и длительной нагрузки.

Авторы [23] проводят данные исследований на вантовом мосту, в работе [24] идентифицируются колебания и аэродинамические эффекты проезжей части вантового моста, а в исследовании [25] сопоставляются три различных метода идентификации системы применительно к подвесному мосту Альфреда Зампа под Сан-Франциско.

### **Другие обратные задачи**

Идентификация расчетной модели и определение ее параметров, в том числе и поиск возможных неисправностей, является важным, но не единственным классом обратных задач строительной механики. Универсальность разработанных подходов к решению таких задач позволила рассматривать и другие практически важные задачи, естественно, с учетом их особенностей.

*Оценка механических свойств материалов*

В числе первых задач идентификации были задачи, связанные с оценкой свойств конструкционных материалов (механических, теплофизических, идентификация полимерных и композитных материалов).

Так, в статье [26] в общих чертах обсуждается применимость системы идентификации для целей характеристики материала. Основой для предлагаемых подходов являются методы теории идентификации в сочетании с итерационными схемами последовательного уточнения характеристик материалов в образце, учитывающих неоднородное напряженно-деформированное состояние, большие деформации и зависимость от скорости деформирования.

В работе [27] рассмотрены задачи параметрической идентификации механических характеристик композиционных материалов. В математической постановке они сведены к задачам математического программирования. Минимизация полученной целевой функции производится с применением стабилизирующего функционала. В работах приведены примеры практической реализации предложенного метода в задачах обработки экспериментальных данных.

Идентификации параметров, позволяющих построить обобщенную кривую деформирования и описать свойства материала во всем диапазоне испытываемых нагрузок, вызывающих как упругое, так и пластическое деформирование, посвящено исследование [28], которое основано на анализе поведения образца при внедрении индентора в массив материала.

Многие исследования посвящены идентификации механических характеристик для конструкций на упругом основании, в которых основной проблемой является восстановление неизвестных свойств реального грунтового основания. Чаще всего задача ставилась как определение параметров известной модели упругого основания, например Винклера или Пастернака [29–31].

*Восстановление исходного состояния*

В механике иногда изучают задачи, в которых граничных или начальных условий недостаточно для определения решения. Для этого необходимо ввести подходящее количество вспомогательных данных для дополнения информации. Эти вспомогательные данные почти всегда получаются из измерений, выполненных на границе или в области. В этом контексте возникает много интересных технических проблем, например, таких как моделирование статических или динамических воздействий.

Типичной является так называемая задача Коши в линейной теории упругости, которая может быть сформулирована следующим образом: учитывая нагрузки и смещения на доступной части границы упругого тела, следует оценить ту же информацию на недоступной части границы. Эта проблема имеет много практических применений, поскольку в реальных задачах иногда данные о граничных условиях являются неполными (например, из-за недоступности для наблюдений). Примеры решения таких задач приведены, например, в работах [32, 33].

Примером практического применения может служить публикация [34], в которой описывается процедура моделирования и идентификации гранич-

ных условий для консольно-подобных структур. Задача решалась применительно к уточнению расчетной модели крыла самолета, ее решение с использованием анализа чувствительности собственных частот позволило точно смоделировать как жесткость защемления, так и граничную массу.

В линейных задачах строительной механики вопрос об исходном состоянии, как правило, не стоит – считается, что ненагруженная система имеет нулевые перемещения и напряжения. Исключением являются задачи о предварительно напряженных системах, где предполагается присутствие некоторой системы внутренних усилий, находящихся в равновесии с нулевой внешней нагрузкой. Преднапряжение создают для получения некоторой желательной картины распределения внутренних усилий, которая должна быть реализованной при расчетном нагружении. Поскольку желательная картина полагается полностью известной, то достаточно решить полностью определенную задачу о разгрузке системы, что реализуется теми же способами, что и для прямых задач.

Более сложная обратная задача связана с определением остаточных напряжений, т. е. напряжений, соответствующих нулевым нагрузкам. Для этого иногда используются методы испытаний, требующие создания отверстия или разреза в конструкции, но иногда требуется решить задачу неразрушающим способом. Задача решается на основе анализа эффекта, вызванного дополнительной испытательной нагрузкой и измеренных в подходящем числе точек [35–37]. При этом учитывается возможность наличия ошибок в измеренных данных.

#### *Восстановление нагрузок*

Оценка сил возбуждения является важной проблемой в анализе конструкций. Когда это возможно, для непосредственного измерения используются датчики силы, однако такое прямое измерение во многих ситуациях затруднительно или невозможно. В качестве примера укажем на идентификацию неизвестных нагрузок, приложенных к свае, входящей в систему стабилизации крутого горного склона, по данным об измерениях перемещений в точках, расположенных вдоль оси свай [38].

Кроме того, определение нагрузок механической системы представляет несомненный интерес как инструмент для диагностики эффективности и неэффективности всякого рода силозадающих устройств. Всякий раз, когда непосредственное знание о силе невозможно, мы идем обратным путем. Таким образом, следует обратный процесс, и при таких обстоятельствах идентификация силы является обратной задачей. Статические задачи указанного типа рассматривались, например, в работах [39–41].

Но чаще всего нас интересует решение такой динамической задачи, когда из измерения набора динамических откликов в некоторых точках конструкции (например, ускорений, смещений или деформаций) можно косвенно оценить силы. Идентификация силы может быть выполнена либо во временной области, либо в частотной области. В качестве примера первого подхода укажем на работу [42], где для линейной системы рассматриваемая задача, относящаяся к классу граничных обратных задач механики, сведена к системе линейных алгебраических уравнений относительно коэффициен-



тов, посредством которых искомое воздействие аппроксимируется кусочно-постоянной функцией. При этом для вычисления входящих в элементы расчетных систем значений передаточной функции, соответствующих показаниям регистрируемой величины на единичное ступенчатое воздействие, был использован метод конечных элементов. Решения в частотной области приводятся, например, в работах [43, 44].

### Заключительные замечания

Представленный выше краткий обзор публикаций по задачам системной идентификации конструкций и примыкающим к ним проблемам является далеко не полным. Его основной задачей было привлечение внимания специалистов к этой активно развивающейся области исследований, имеющей важное практическое значение.

Большинство опубликованных работ посвящено небольшим и академическим задачам. Системная идентификация крупных реальных конструкций с нелинейным поведением, подверженным неизвестным динамическим нагрузкам, таким, например, как сильные движения грунта при землетрясениях, является сложной и еще не до конца решенной задачей. Полагаем, что ее реализация станет важной темой будущих исследований.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ляхович Л.С.* Особые свойства оптимальных систем и основные направления их реализации в методах расчета сооружений. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2009. 372 с.
2. *Эйкхофф П.* Основы идентификации систем управления. Москва : Мир, 1975. 680 с.
3. *Kozin F., Kozin C.H.* A moment technique for system parameter identification // *Shock and Vibration Bulletin*. 1968. № 38. P. 119–131.
4. *Berman A., Flannelly W.G.* Theory of Incomplete Models of Dynamic Structures // *AIAA Journal*. 1971. № 8. P. 1481–1487. (Русский перевод: Берман, Фланели. Теория неполных динамических моделей конструкций // *Ракетная техника и космонавтика*. 1971. № 8).
5. *Baruch M.* Optimal correction of mass and stiffness matrices using measured modes // *AIAA Journal*. 1982. V. 20. № 11. P. 1623–1626.
6. *Berman A., Nagy E.J.* Improvement of a large analytical model using test data // *AIAA Journal*. 1983. V. 21. № 8. P. 1168–1173.
7. *Еманов А.Ф., Селезнёв В.С., Бах А.А.* Когерентное восстановление полей стоячих волн как основа детального сейсмологического обследования инженерных сооружений // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2007. № 3. С. 20–23.
8. *Бах А.А., Красников А.А.* Использование метода стоячих волн для анализа динамических характеристик высотных зданий на примере 40-этажного комплекса «Дирижабль», г. Москва // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2014. № 1. С. 26–30.
9. *Белостоцкий А.М., Каличава Д.К., Аул А.А., Нагибович А.И.* Адаптируемые конечно-элементные модели на основе динамического мониторинга несущих конструкций высотных зданий. Ч. 3. Апробация методики на высотном комплексе, возведенном с выявленными отступлениями от проекта // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2012. V. 8. I. 4. P. 44–55.
10. *Алберт А.* Регрессия, псевдоинверсия и рекуррентное оценивание. Москва : Наука, 1977. 301 с.
11. *Белостоцкий А.М., Каличава Д.К.* Адаптируемые конечно-элементные модели на основе динамического мониторинга несущих конструкций высотных зданий. Ч. 1. Основы разработанной расчетно-экспериментальной методики // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2012. V. 8. I. 4. P. 20–29.

12. Белостоцкий А.М., Кухта А.В. Адаптивные математические модели для систем мониторинга строительных объектов // Предотвращение аварий зданий и сооружений : электронный журнал. 2011. URL: <http://www.pamag.ru/prensa/adaptive-math-method>
13. Allemang R.J., Brown D.L. A correlation coefficient for modal vector analysis // 1st International Modal Analysis Conference, SEM, Orlando, Florida, 198. P. 110–116.
14. Ватульян А.О. Обратные задачи в механике деформируемого твердого тела. Москва : Физматгиз, 2007. 224 с.
15. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. Москва : Наука, 1979. 284 с.
16. Постнов В.А. Использование метода регуляризации Тихонова для решения задач идентификации упругих систем // Известия РАН МТТ. 2010. № 1. С. 64–71.
17. Tang J.P., Leu K.M. Vibration Tests and Damage Detection of P/C Bridge // Journal of the Chinese Institute of Engineers. 1991. V. 14. P. 531–536.
18. Hunt D.L., Weiss S.P., West W.M., Dunlap T.A., Freesmeyer S.R. Development and Implementation of a Shuttle Modal Inspection System // Sound and Vibration. 1990. V. 24. № 9. P. 34–42.
19. Robinson N.A., Peterson L.D., James G.H., Doebling S.W. Damage Detection in Aircraft Structures Using Dynamically Measured Static Flexibility Matrices // Proc. of the 14th International Modal Analysis Conference. 1996. P. 857–865.
20. Yu H., Mohammed M.A., Mohammadi M.E., Moaveni B., Barbosa A.R., Richard A.S., Wood L. Structural Identification of an 18-Story RC Building in Nepal Using Post-Earthquake Ambient Vibration and Lidar Data // Frontiers in Built Environment. 2017. 3: 11.
21. Feng M.Q., Kim J.M., Xue H. Identification of a dynamic system using ambient vibration measurements // J. Appl. Mech. 1998. V. 659. P. 1010–1021.
22. Cavaleri L., Ferrotto M.F., Di Trapani F., Alessandro A. Vibration Tests and Structural Identification of the Bell Tower of Palermo Cathedral // The Open Construction & Building Technology Journal. 2020. V. 14. P. 319–330.
23. Macdonald J., Daniell W. Variation of modal parameters of a cable-stayed bridge identified from ambient vibration measurements and FE modeling // Engineering Structures. 2005. V. 27. P. 1916–1930.
24. Plevris V., Papadarakakis M. A hybrid particle swarm-gradient algorithm for global structural optimization // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2011. V. 26. № 1. P. 48–68.
25. He X., Moaveni B., Conte J., Elgamal A., Masri S. System identification of Alfred Zampa memorial bridge using dynamic field test data // Journal of Structural Engineering. 2009. V. 135. P. 54–66.
26. Баженов В.Г. Математическое моделирование и методы идентификации деформационных и прочностных характеристик материалов // Физическая мезомеханика. 2007. Т. 10. № 5. С. 91–105.
27. Каюмов Р.А. Расширенная задача идентификации механических характеристик материалов по результатам испытаний конструкций // Известия АН. Механика твердого тела. 2004. № 2. С. 94–103.
28. Гук Н.А., Ободан Н.И. Идентификация механических свойств материала по результатам косвенных измерений // Механика твердого тела : межвед. сб. науч. тр. Вып. 40. 2010. С. 233–242.
29. Кузнецов С.Ф., Семенов А.С. Метод определения механического состояния конструкций, взаимодействующих с неоднородным грунтовым основанием // Справочник. Инженерный журнал. 2012. № 3. С. 23–31.
30. Гук Н.А. Идентификация свойств оснований сооружений методом обратных задач // Математическое и компьютерное моделирование. Серия: Физико-математические науки. 2012. С. 65–76 (на укр. языке).
31. Jang T.S., Sung H.G., Han S.L., Kwon S.H. Inverse determination of the loading source of the infinite beam on elastic foundation. // Journal of Mechanical Science and Technology. 2008. V. 22. № 12. P. 2350–2356.
32. Bilotta A., Turco E. A numerical study on the solution of the Cauchy problem in elasticity // International Journal of Solids and Structures. 2009. V. 46. P. 4451–4477.
33. Marin L. The minimal error method for the Cauchy problem in linear elasticity. Numerical implementation for two-dimensional homogeneous isotropic linear elasticity // International Journal of Solids and Structures. 2009. V. 46. P. 951–974.

34. Wei Liu, Zhichun Yang, Le Wang, Ning Guo. Boundary condition modelling and identification for cantilever-like structures using natural frequencies // Chinese Journal of Aeronautics. 2019. V. 32. I. 6. P. 1451–1464.
35. Turco E. A strategy to identify exciting forces acting on structures // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2005. V. 64. P. 1483–1508.
36. Turco E. Identification of axial forces on statically indeterminate pin-jointed trusses by a non-destructive mechanical test // The Open Civil Engineering Journal. 2013. V. 7. P. 50–57.
37. Ballard P., Constantinescu A. On the inversion of subsurface residual stresses from surface stress measurements. // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1994. V. 42. P. 1767–1788.
38. Ring W. Identification of the load of a partially breaking beam from inclination measurements // Inverse Problems. 1999. V. 15. № 4. P. 1003–1020.
39. Jacquelin E., Bennani A., Hamelin P. Force reconstruction: analysis and regularization of a deconvolution problem // Sound and Vibration. 2003. V. 265. P. 81–107.
40. Pister K. Mathematical modeling for structural analysis and design // Nuclear Engineering and Design. 1972. V. 8. P. 353–375.
41. Reddy A.N., Ananthasuresh G.K. On computing the forces from the noisy displacement data of an elastic body // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2008. V. 76. № 11. P. 1645–1677.
42. Янчевский И.В. К проблеме восстановления временной зависимости нестационарного воздействия, приложенного к упруго-деформируемому элементу конструкции // Проблемы машиностроения. 2015. Т. 18. № 2. С. 43–54.
43. Jang T.S., Han S.L. Numerical experiments on determination of spatially concentrated time-varying loads on a beam: an iterative regularization method // The Journal of Mechanical Science and Technology. 2009. V. 23. № 10. P. 2722–2729.
44. Wang B.T., Chiu C.H. Determination of unknown impact force acting on a simply supported beam // Mechanical System and Signal Processing. 2003. V. 17. № 3. P. 683–704.

## REFERENCES

1. Litykhovich L.S. Osobyie svojstva optimalnykh system i osnovnye napravleniya ikh realizacii v metodakh rascheta sooruzhenij [Properties of optimum systems and their implementation in structural analysis]. Tomsk: TSUAB, 2009. 372 p. (rus)
2. Eykhoff P. Osnovy identifikacii system upravleniya [System identification]. Moscow: Mir. 1975. 680 p. (transl. from Dutch)
3. Kozin F., Kozin C.H. A moment technique for system parameter identification. *Shock and Vibration Bulletin*. 1968. No. 38. Pp. 119–131.
4. Berman A., Flannelly W.G. Theory of incomplete models of dynamic structures. *AIAA Journal*. 1971. No. 8. Pp. 1481–1487.
5. Baruch M. Optimal correction of mass and stiffness matrices using measured modes. *AIAA Journal*. 1982. V. 20. No. 11. Pp. 1623–1626.
6. Berman A., Nagy E.J. Improvement of a large analytical model using test data. *AIAA Journal*. 1983. V. 21. No. 8. Pp. 1168–1173.
7. Emanov A.F., Seleznyov V.S., Bah A.A. Kogerentnoe vosstanovlenie polej stoyachih voln kak osnova detalnogo seismologicheskogo obsledovaniya inzhenernyh sooruzhenij [Coherent restoration of standing wave fields as a basis for detailed seismological survey of engineering structures]. *Seismostoitkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2007. No. 3. Pp. 20–23.
8. Bah A.A., Krasnikov A.A. Ispolzovanie metoda stoyachih voln dlya analiza dinamicheskikh harakteristik vysotnyh zdaniy na primere 40-etazhnogo kompleksa "Dirizhabl", g. Moskva [Standing waves method in the analysis of dynamic characteristics of high-rise buildings on the example of 40-storey complex "Dirigible", Moscow]. *Seismostoitkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2014. No. 1 Pp. 26–30.
9. Belostockij A.M., Kalichava D.K., Aul A.A., Nagibovich A.I. Adaptiruemye konechno-elementnye modeli na osnove dinamicheskogo monitoringa nesushih konstrukcij vysotnyh zdaniy. Chast 3. Aprobaciya metodiki na vysotnom komplekse, vozvedennom s vyyavlennymi otstupleniyami ot proekta [Adaptable finite element models based on dynamic monitoring of

- bearing structures of high-rise buildings. Pt 3. Methodology approbation on a high-rise complex erected with identified deviations from the project]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2012. V. 8. No. 4. Pp. 44–55.
10. Albert A. Regressiya, psevdoinversiya i rekurrentnoe ocenivanie [Regression, and the moor Penrose pseudoinverse]. Moscow: Nauka, 1977. 301 p. (transl. from Engl.)
  11. Belostockij A.M., Kalichava D.K. Adaptiruemye konechnoelementnye modeli osnove dinamicheskogo monitoringa nesushih konstrukcij vysotnyh zdaniy. Chast 1. Osnovy razrabotannoj raschetno-eksperimentalnoj metodiki [Adaptable finite element models based on dynamic monitoring of bearing structures of high-rise buildings. Pt 1. The developed calculation and experimental methodology]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2012. V. 8. No. 4. Pp. 20–29.
  12. Belostockij A.M., Kuhta A.V. Adaptivnye matematicheskie modeli dlya sistem monitoringa stroitelnyh obektov. [Adaptive mathematical models for construction monitoring systems]. Predotvrashchenie avari j zdani j i sooruzheni. 2011. Available: [www.pamag.ru/prensa/adaptive-math-method](http://www.pamag.ru/prensa/adaptive-math-method)
  13. Allemang R.J., Brown D.L. A correlation coefficient for modal vector analysis. *1st International Modal Analysis Conference, SEM*. Orlando, Florida, 1982. Pp. 110–116.
  14. Vatulyan A.O. Obratnye zadachi v mehanike deformiruemogo tverdogo tela [Inverse problems in mechanics of deformable solid]. Moscow: Fizmatgiz, 2007. 224 p. (rus)
  15. Tihonov A.N., Arsenin V.Ya. Metody resheniya nekorrektnykh zadach [Methods for solving incorrect problems]. Moscow: Nauka, 1979. 284 p. (rus)
  16. Postnov V.A. Ispolzovanie metoda regularizacii Tihonova dlya resheniya zadach identifikacii uprugih system [Use of Tikhonov's regularization method to solve problems of elastic system identification]. *Izv. RAN MTT*. 2010. No. 1. Pp. 64–71. (rus)
  17. Tang J.P., Leu K.M. Vibration tests and damage detection of P/C bridge. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. 1991. V. 14. Pp. 531–536.
  18. Hunt D.L., Weiss S.P., West W.M., Dunlap T.A., Freesmeyer S.R. Development and implementation of a shuttle modal inspection system. *Sound and Vibration*. 1990. V. 24. No. 9. Pp. 34–42.
  19. Robinson N.A., Peterson L.D., James G.H., Doebling S.W. Damage detection in aircraft structures using dynamically measured static flexibility matrices. *Proc. 14th Int. Conf. on Modal Analysis*. 1996. Pp. 857–865.
  20. Yu H., Mohammed M.A., Mohammadi M.E., Moaveni B., Barbosa A.R., Richard A.S., Wood L. Structural identification of an 18-story RC building in Nepal using post-earthquake ambient vibration and lidar data. *Frontiers in Built Environment*. 2017. V. 3. No. 11.
  21. Feng M.Q., Kim J.M., Xue H. Identification of a dynamic system using ambient vibration measurements. *Journal of Applied Mechanics*. 1998. V. 659. Pp. 1010–1021.
  22. Cavaleri L., Ferrotto M.F., Di Trapani F., Alessandro A. Vibration tests and structural identification of the Bell Tower of Palermo Cathedral. *The Open Construction & Building Technology Journal*. 2020. V. 14. Pp. 319–330.
  23. Macdonald J., Daniell W. Variation of modal parameters of a cable-stayed bridge identified from ambient vibration measurements and FE modeling. *Engineering Structures*. 2005. V. 27. Pp. 1916–1930.
  24. Plevris V., Papadrakakis M. A hybrid particle swarm-gradient algorithm for global structural optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2011. V. 26. No. 1. Pp. 48–68.
  25. He X., Moaveni B., Conte J., Elgamal A., Masri S. System identification of Alfred Zampa memorial bridge using dynamic field test data. *Journal of Structural Engineering*. 2009. V. 135. Pp. 54–66.
  26. Bazhenov V.G. Matematicheskoe modelirovanie i metody identifikacii deformacionnykh i prochnostnykh harakteristik materialov [Mathematical modeling and methods to identify deformation and strength characteristics of materials]. *Fizicheskaya mezomehanika*. 2007. V. 10. No. 5. Pp. 91–105. (rus)
  27. Kayumov R.A. Rasshirennaya zadacha identifikacii mehanicheskikh harakteristik materialov po rezultatam ispytanij konstrukcij [Extended problem of identification of mechanical properties of materials by structural test results]. *Izv. AN. Mehanika tverdogo tela*. 2004. No. 2. Pp. 94–103. (rus)
  28. Guk N.A., Obodan N.I. Identifikaciya mehanicheskikh svoystv materiala po rezultatam kosvennykh izmerenij [Identification of mechanical properties of material by indirect measurements]. *Mehanika tverdogo tela*. 2010. No. 40. Pp. 233–242. (rus)

29. Kuznecov S.F., Semenov A.C. Metod opredeleniya mehanicheskogo sostoyaniya konstrukcij, vzaimodejstvuyushih s neodnorodnym gruntovym osnovaniem [Determination of mechanical state of structures interacting with heterogeneous ground base]. *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal*. 2012. No. 3. Pp. 23–31. (rus)
30. Guk N.A. Identifikaciya svoystv osnovanij sooruzhenij metodom obratnyh zadach [Identification of properties of foundation structures using inverse problems]. *Matematicheskoe i kompyuternoe modelirovanie. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki*. 2012. Pp. 65–76.
31. Jang T.S., Sung H.G., Han S.L., Kwon S.H. Inverse determination of the loading source of the infinite beam on elastic foundation. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2008. V. 22. No. 12. Pp. 2350–2356.
32. Bilotta A., Turco E. A numerical study on the solution of the Cauchy problem in elasticity. *International Journal of Solids and Structures*. 2009. V. 46. Pp. 4451–4477.
33. Marin L. The minimal error method for the Cauchy problem in linear elasticity. Numerical implementation for two-dimensional homogeneous isotropic linear elasticity. *International Journal of Solids and Structures*. 2009. V. 46. Pp. 951–974.
34. Wei Liu, Zhichun Yang, Le Wang, Ning Guo. Boundary condition modelling and identification for cantilever-like structures using natural frequencies. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2019. V. 32. No. 6. Pp. 1451–1464.
35. Turco E. A strategy to identify exciting forces acting on structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2005. V. 64. Pp. 1483–1508.
36. Turco E. Identification of axial forces on statically indeterminate pin-jointed trusses by a non-destructive mechanical test. *The Open Civil Engineering Journal*. 2013. V. 7. Pp. 50–57.
37. Ballard P., Constantinescu A. On the inversion of subsurface residual stresses from surface stress measurements. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1994. V. 42. Pp. 1767–1788.
38. Ring W. Identification of the load of a partially breaking beam from inclination measurements. *Inverse Problems*. 1999. V. 15. No. 4. Pp. 1003–1020.
39. Jacquelin E., Bennani A., Hamelin P. Force reconstruction: analysis and regularization of a deconvolution problem. *Sound and Vibration*. 2003. V. 265. Pp. 81–107.
40. Pister K. Mathematical modeling for structural analysis and design. *Nuclear Engineering and Design*. 1972. V. 8. Pp. 353–375.
41. Reddy A.N., Ananthasuresh G.K. On computing the forces from the noisy displacement data of an elastic body. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2008. V. 76. № 11. Pp. 1645–1677.
42. Yanchevskii I.V. K probleme vosstanovleniya vremennoi zavisimosti nestatsionarnogo vozdeistviya, prilozhennogo k upругo-deformiruемому elementu konstruksii [Restoration of temporary dependence of non-stationary disturbance applied to elastically deformed structural element]. *Problemy mashinostroeniya*. 2015. V. 18. No. 2. Pp. 43–54.
43. Jang T.S., Han S.L. Numerical experiments on determination of spatially concentrated time-varying loads on a beam: an iterative regularization method. *The Journal of Mechanical Science and Technology*. 2009. V. 23. No. 10. Pp. 2722–2729.
44. Wang B.T., Chiu C.H. Determination of unknown impact force acting on a simply supported beam. *Mechanical System and Signal Processing*. 2003. V. 17. No 3. Pp. 683–704.

#### Сведения об авторах

Перельмутер Анатолий Викторович, докт. техн. наук, НПО SCAD Soft, 03037, Украина, г. Киев, ул. Освиты, 3а, AnatolyPerelmutter@gmail.com

#### Authors Details

Anatoly V. Perelmutter, DSc, SCAD Soft, 3-a, Prosveshcheniya Str., 03037, Kiev, Ukraine, AnatolyPerelmutter@gmail.com

УДК 539.375

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-102-113

*Д.Д. ЯХЬЯЕВ,**Азербайджанский технический университет*

## ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОЙ КЛЕПАНОЙ ПЕРФОРИРОВАННОЙ ПАНЕЛИ С ТРЕЩИНАМИ

Получено решение задачи о взаимодействии двух факторов: усиления панели системой стрингеров и ее ослабления рядом круговых отверстий и двумя трещинами вдоль отрезков абсцисс, находящимися вблизи контура каждого отверстия. Контур отверстия и берега трещин свободны от внешних нагрузок. К панели прикреплены периодическая система поперечных ребер жесткости. Клепаная панель подвергается растяжению вдоль ребер жесткости постоянными напряжениями  $\sigma_0$ . Действие приклепанных подкрепляющих ребер жесткости моделируется неизвестными сосредоточенными силами, приложенными в местах расположения точек крепления.

Предложена эффективная методика решения задачи о подкреплении поперечными ребрами жесткости пластин, ослабленных концентраторами напряжений (отверстия, трещины), при силовом нагружении. Найдены коэффициенты интенсивности напряжений и предельные нагрузки в зависимости от геометрических и физических параметров задачи.

**Ключевые слова:** упругая клепаная панель; трещины вблизи отверстий; сосредоточенные силы; одноосное растяжение; коэффициенты интенсивности напряжений; критические нагрузки.

**Для цитирования:** Яхьяев Д.Д. Исследование упругой клепаной перфорированной панели с трещинами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 4. С. 102–113.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-102-113

*J.D. YAKHYAEV,**Azerbaijan Technical University*

## ELASTIC RIVETED PERFORATED PLATE WITH CRACKS

The paper proposes the problem solution for interaction of two following factors: perforated plate reinforcement by a stringer system and its loosening by a number of circular holes and two cracks along the x-axis near each hole. The hole and crack edges are free from external loads. The riveted plate is subjected to tension by strengthening ribs via constant stresses. The action of riveted reinforcing strengthening ribs is modeled by unknown concentrated forces applied to anchor points.

An effective solution is proposed for the reinforcement by transverse strengthening ribs of plates weakened by stress concentrators (holes, cracks) under loading. The stress intensity and ultimate loads are found depending on geometrical and physical parameters of the problem.

**Keywords:** elastic riveted plate; cracks; concentrated forces; uniaxial tension; stress intensity; critical load.

**For citation:** Yakhyayev J.D. Issledovanie uprugoi klepannoi perforirovannoi paneli s treshchinami [Elastic riveted perforated plate with cracks]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 4. Pp. 102–113.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-102-113

### Введение

В различных отраслях производства, в том числе в строительстве, транспортном машиностроении, для снижения материалоемкости конструкций, повышения их прочности и эксплуатационной надежности широко используют подкрепление панелей упругими элементами [1, 2]. Кроме того, прикрепление ребер жесткости также может проводиться после обнаружения эксплуатационных трещин в виде ремонтных заплат [2]. В последние годы получили применение новые принципы проектирования различных изделий для строительной отрасли, транспортного машиностроения, таких как перфорированные балки и тонкостенные профили листовых тонкостенных конструкций и др., допускающие возможность безопасного повреждения конструкций. Это позволяет повысить эксплуатационный ресурс конструкций [1–8].

Анализ хрупкого разрушения многих конструкций показывает, что разрушение, как правило, начинается с поверхности различных отверстий, выточек, щелей и других концентраторов. Наличие устойчивых трещин в конструкциях и сооружениях, работающих в определенных режимах изменения внешних нагрузок, гораздо менее опасно, а искусственное усиление таких конструкций (за счет постановки заклепок, ребер жесткости на пути роста трещины) может значительно продлить их срок службы.

В строительной отрасли, современном транспортном машиностроении широкое применение получили тонкостенные элементы конструкции (панели), усиленные ребрами жесткости и ослабленные отверстиями. Ребра жесткости применяют с целью снижения уровня концентрации напряжений и повышения жесткости панели. Характер взаимодействия ребер жесткости и дефектов существенным образом определяет напряженно-деформированное состояние конструкции (панели) в целом. Работоспособность тонкостенных элементов (пластин) во многих случаях предопределяется наличием в тонкостенном элементе дефектов типа трещин. Вблизи таких дефектов в процессе деформирования панели возникает высокая концентрация напряжений, что приводит к зарождению и развитию полос пластических деформаций, возникновению начальных и росту уже имеющихся в панели трещин. Представляет значительный интерес оценка эффективности применения подкрепляющих элементов для ограничения роста трещин в тонкостенных элементах строительных конструкций. Поэтому решение задач механики разрушения для пластинок с трещинами, усиленных подкрепляющими ребрами жесткости, представляет большой теоретический и практический интерес.

### Постановка задачи

Рассматривается бесконечная изотропная упругая пластина толщиной  $h$ , ослабленная круговыми отверстиями радиуса  $\lambda$ . Центры отверстий находятся в точках  $P_m = t\omega$  ( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ). Вблизи каждого кругового отверстия панель ослаблена двумя равными прямолинейными трещинами вдоль отрезков оси абсцисс. Контур отверстия и берега трещин свободны от внешних усилий. По мере увеличения интенсивности растягивающей нагрузки в панели вокруг отверстий образуются зоны повышенных напряжений. Зоны повышен-

ных напряжений способствуют развитию образовавшихся возле отверстий трещин, что в свою очередь может привести к полному разрушению панели.

К пластине приклепана бесконечная периодическая система поперечных ребер жесткости в точках  $z = mL + iny_0$  ( $m = 2k - 1$ ;  $k = 1, 2, \dots$ ;  $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ ).

Выбор системы координат и обозначения пояснены на рис. 1.

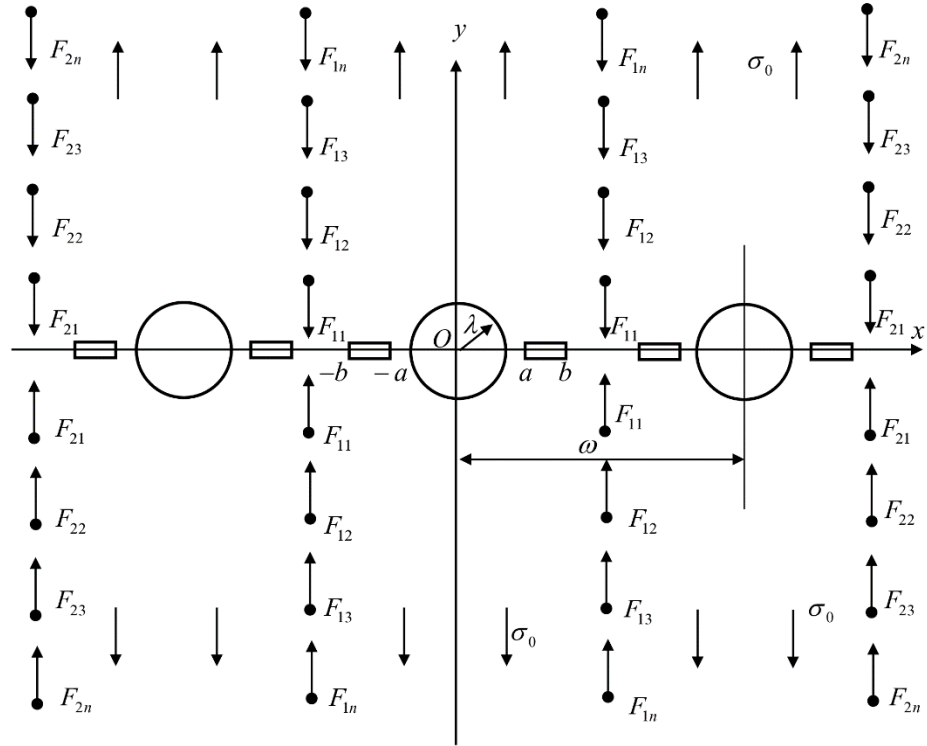


Рис. 1. Расчетная схема упругой клепаной перфорированной панели с трещинами

Клепаная пластина подвергается растяжению вдоль ребер жесткости напряжениями  $\sigma_y^\infty = \sigma_0$ . Действие приклепанных подкрепляющих ребер на схеме заменено сосредоточенными силами, приложенными в местах расположения заклепок (точек крепления) (рис. 1).

Рассматриваемая задача состоит в определении величин сосредоточенных сил  $F_{mn}$  ( $m = 1, 2, \dots$ ;  $n = 1, 2, \dots$ ), напряженно-деформированного состояния вне круговых отверстий и трещин, а также в нахождении величины предельной внешней нагрузки  $\sigma_0$ , по достижении которой трещина начинает развиваться по сечению пластины.

Граничные условия в рассматриваемой задаче имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma_r - i\tau_{r\theta} &= 0 \text{ — на контурах отверстий,} \\ \sigma_y - i\tau_{xy} &= 0 \text{ при } y = 0 \text{ — на берегах трещин.} \end{aligned} \quad (1)$$



### Решение краевой задачи

На основании формул Колосова – Мусхелишвили [9] и граничных условий на контурах отверстий и берегах трещин задача сводится к определению двух аналитических функций  $\Phi(z)$  и  $\Psi(z)$  из краевых условий:

$$\Phi(\tau) + \overline{\Phi(\tau)} - [\bar{\tau}\Phi'(\tau) + \Psi(\tau)]e^{2i\theta} = 0; \quad (2)$$

$$\Phi(t) + \overline{\Phi(t)} + \bar{t}\Phi'(t) + \Psi(t) = 0, \quad (3)$$

где  $\tau = \lambda e^{i\theta} + m\omega$ ;  $t$  – аффикс точек берегов трещин.

Решение краевой задачи (2) – (3) ищем в виде

$$\Phi(z) = \Phi_0(z) + \Phi_1(z) + \Phi_2(z), \quad (4)$$

$$\Psi(z) = \Psi_0(z) + \Psi_1(z) + \Psi_2(z).$$

Здесь комплексные потенциалы  $\Phi_0(z)$  и  $\Psi_0(z)$  определяют поле напряжений и деформаций в сплошной пластине под действием периодической системы сосредоточенных сил  $F_{mn}$  и  $\sigma_0$  и определяются формулами

$$\begin{aligned} \Phi_0(z) &= \frac{1}{4}\sigma_0 - \frac{1}{2\pi(1+\chi)h} \sum'_{m,n} F_{mn} \left[ \frac{1}{z - mL + iny_0} - \frac{1}{z - mL - iny_0} \right], \\ \Psi_0(z) &= \frac{1}{2}\sigma_0 - \frac{i\chi}{2\pi(1+\chi)h} \sum'_{m,n} F_{mn} \left[ \frac{1}{z - mL + iny_0} - \frac{1}{z - mL - iny_0} \right] + \\ &+ \frac{i}{2\pi(1+\chi)h} \sum'_{m,n} F_{mn} \left[ \frac{Lm - iny_0}{(z - mL - iny_0)^2} - \frac{mL + iny_0}{(z - mL + iny_0)^2} \right]; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Phi_1(z) = \frac{1}{2\omega} \int_L g(t) \operatorname{ctg} \frac{\pi}{\omega}(t - z) dt,$$

$$\Psi_1(z) = -\frac{\pi z}{2\omega^2} \int_L g(t) \sin^{-2} \frac{\pi}{\omega}(t - z) dt, \quad (6)$$

$$\Phi_2(z) = \alpha_0 + \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{2k+2} \frac{\lambda^{2k+2} \rho^{(2k)}(z)}{(2k+1)!},$$

$$\Psi_2(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \beta_{2k+2} \frac{\lambda^{2k+2} \rho^{(2k)}(z)}{(2k+1)!} - \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{2k+2} \frac{\lambda^{2k+2} S^{(2k+1)}(z)}{(2k+1)!}.$$

Интегралы в (5) – (6) берутся по линии  $L = L_1 + L_2$ ;  $L_1 = [-b, -a]$ ;  $L_2 = [a, b]$ ;

$$g(x) = \frac{2\mu}{\chi + 1} \frac{d}{dx} [h(x)],$$

$$h(x) = v(x, +0) - v(x, -0) \text{ на } L.$$

На основании симметрии  $h(-x) = h(x)$ ;  $g(x)$  – искомая функция. К соотношениям (4) – (6) следует добавить дополнительное условие, вытекающее из физического смысла задачи:

$$\int_{-b}^{-a} g(x)dx = 0, \quad \int_a^b g(x)dx = 0. \quad (7)$$

Неизвестная функция  $g(x)$  и потенциалы  $\Phi_2(z)$  и  $\Psi_2(z)$  должны быть определены из краевых условий (2) – (3). Для нахождения функций  $\Phi_2(z)$  и  $\Psi_2(z)$  преобразуем граничное условие (2) к виду

$$\begin{aligned} & \Phi_2(\tau) + \overline{\Phi_2(\tau)} - [\overline{\tau}\Phi'_2(\tau) + \Psi_2(\tau)]e^{2i\theta} = \\ & = -\Phi_*(\tau) - \overline{\Phi_*(\tau)} + [\overline{\tau}\Phi'_*(\tau) + \Psi_*(\tau)]e^{2i\theta}, \\ & \Phi_*(z) = \Phi_0(z) + \Phi_1(z), \quad \Psi_*(z) = \Psi_0(z) + \Psi_1(z). \end{aligned} \quad (8)$$

Неизвестные коэффициенты  $\alpha_{2k}$ ,  $\beta_{2k}$  должны быть определены из краевого условия (8). В силу выполнения условия периодичности система граничных условий (8) заменяется одним функциональным уравнением на контуре  $\tau = \lambda e^{i\theta}$ . Для составления уравнений относительно  $\alpha_{2k+2}$ ,  $\beta_{2k+2}$ , функций  $\Phi_2(z)$  и  $\Psi_2(z)$  представим правую часть граничного условия в виде

$$f_1(\theta) + if_2(\theta) = -\Phi_*(\tau) - \overline{\Phi_*(\tau)} + [\overline{\tau}\Phi'_*(\tau) + \Psi_*(\tau)]e^{2i\theta}.$$

Относительно функции  $f_1(\theta) + if_2(\theta)$  будем считать, что она разлагается на контуре  $|\tau| = \lambda$  в ряд Фурье. В силу симметрии этот ряд имеет вид

$$f_1(\theta) + if_2(\theta) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_{2k} e^{2ik\theta}, \quad \text{Im } A_{2k} = 0, \quad (9)$$

$$A_{2k} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [f_1 + if_2] e^{-2ik\theta} d\theta \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

Подставив в (9) выражение после вычисления интегралов с помощью теории вычетов, найдем:

$$\begin{aligned} A_0 &= -\frac{1}{2}\sigma_0 - \frac{1}{2\omega} \int_L g(t) f_0(t) dt, \\ f_0(t) &= 2\gamma(t), \quad \gamma(t) = \text{ctg} \frac{\pi}{\omega} t, \\ A_2 &= \frac{1}{2}\sigma_0 - \frac{1}{\pi(1+\chi)h} \sum_{m,n} 'F_{mn} \left[ \frac{\lambda^2 \sin 3\varphi_1}{\rho_1^3} + \frac{\chi \sin \varphi_1}{\rho_1} - \frac{\sin 3\varphi_1}{\rho_1} \right] - \frac{1}{2\omega} \int_L g(t) f_2(t) dt, \\ f_2(t) &= -\frac{\lambda^2}{2} \gamma^{(2)}(t), \\ A_{2k} &= \frac{1}{\pi(1+\chi)h} \sum_{m,n} 'F_{mn} \left[ \frac{\lambda^{2k} \sin(2k+1)\varphi_1}{\rho_1^{2k+1}} + \frac{(-2)(-3)\dots(-2k)\lambda^{2k} \sin(2k+1)\varphi_1}{(2k-1)!\rho_1^{2k+1}} - \right. \\ & \quad \left. - \frac{\chi\lambda^{2k-2} \sin(2k-1)\varphi_1}{\rho_1^{2k-1}} + \frac{(-2)(-3)\dots(1-2k)\lambda^{2k-2} \sin(2k+1)\varphi_1}{(2k-2)!\rho_1^{2k+1}} \right] - \end{aligned}$$

$$-\frac{1}{2\omega} \int_L g(t) f_{2k}(t) dt. \quad (10)$$

$$f_{2k}(t) = -\frac{\lambda^{2k}(2k-1)}{(2k)!} \gamma^{(2k)}(t) + \frac{\lambda^{2k-2}}{(2k-3)!} \gamma^{(2k-2)}(t) \quad (k=2, 3, \dots),$$

$$A_{-2k} = \frac{1}{\pi(1+\chi)h} \sum_{m,n} F_{mn} \frac{\lambda^{2k} \sin(2k+1)\varphi_1}{\rho_1^{2k+1}} - \frac{1}{2\omega} \int_L g(t) f_{-2k}(t) dt,$$

$$f_{-2k}(t) = \frac{\lambda^{2k}}{(2k)!} \gamma^{(2k)}(t) \quad (k=1, 2, \dots).$$

Таким образом, граничное условие (8) принимает следующий вид:

$$\Phi_2(\tau) + \overline{\Phi_2(\tau)} - [\bar{\tau}\Phi'_2(\tau) + \Psi_2(\tau)]e^{2i\theta} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_{2k}e^{2i\theta}.$$

Учитывая соотношение для  $\Phi_2(z)$  и  $\Psi_2(z)$  и применяя метод степенных рядов для определения коэффициентов  $\alpha_{2k}$ ,  $\beta_{2k}$ , получаем две бесконечные линейные алгебраические системы. Эти системы имеют вид

$$\alpha_{2j+2} = \sum_{k=0}^{\infty} A_{j,k} \alpha_{2k+2} + b_j \quad (j=0, 1, 2, \dots), \quad (11)$$

$$b_0 = A'_2 - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{g_{k+2} \cdot \lambda^{2k+4}}{2^{2k+4}} A'_{2k-2},$$

$$b_j = A'_{2j+2} - \frac{(2j+1)A'_0 g_{j+1} \lambda^{2j+2}}{k_1 2^{2j+2}} - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(2j+2k+3)! g_{j+k+2} \lambda^{2k+2j+4}}{(2j)!(2k+3)! 2^{2j+2k+4}} A'_{2k-2},$$

$$A'_{2k} = A_{2k} + B_{2k}, \quad k_1 = 1 - \frac{\pi^2}{12} \lambda^2,$$

$$g_j = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^{2j}}, \quad A_{j,k} = (2j+1) \gamma_{j,k} \lambda^{2k+2j+2},$$

$$\gamma_{0,0} = \frac{3}{8} g_2 \lambda^2 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(2i+1) g_{i+1}^2 \lambda^{4i+2}}{2^{4i+4}},$$

$$\gamma_{j,k} = -\frac{(2j+2k+2)! g_{j+k+1}}{(2j+1)!(2k+1)! 2^{2j+2k+2}} + \frac{(2j+2k+4)! g_{j+k+2} \lambda^2}{(2j+2)!(2k+2)! 2^{2j+2k+4}} +$$

$$+ \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(2j+2i+1)!(2k+2i+1)! g_{j+i+1} g_{k+i+1} \lambda^{4i+2}}{(2i+1)!(2j+1)!(2k+1)!(2i)! 2^{2j+2k+4i+4}} + b_{j,k},$$

$$b_{0,k} = 0, \quad b_{j,0} = 0,$$

$$b_{j,k} = \frac{g_{j+1} g_{k+1} \lambda^2}{2^{2j+2k+4}} \left( 1 + \frac{2k_2 \lambda^2}{k_1} \right),$$

$$k_2 = \frac{\pi^2}{24}, \quad (j = 1, 2, \dots), \quad (k = 1, 2, \dots);$$

$$\beta_2 = \frac{1}{k_1} \left[ -A'_0 + 2 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{g_{k+1} \cdot \lambda^{2k+2}}{2^{2k+2}} \alpha_{2k+2} \right], \quad (12)$$

$$\beta_{2j+4} = (2j+3)\alpha_{2j+2} + \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(2j+2k+3)! g_{j+k+2} \lambda^{2j+2k+2}}{(2j+2)!(2k+1)! 2^{2j+2k+4}} \alpha_{2k+2} - A'_{-2j-2}.$$

Требуя, чтобы функции удовлетворяли краевому условию (3), получим сингулярное интегральное уравнение относительно  $g(x)$

$$\frac{1}{\omega} \int_L g(t) \operatorname{ctg} \frac{\pi}{\omega} (t-x) dt + H(x) = 0. \quad (13)$$

Здесь  $H(x)$  определяются соотношениями

$$H(x) = \Phi_s(x) + \overline{\Phi_s(x)} + x\Phi'_s(x) + \Psi_s(x),$$

$$\Phi_s(x) = \Phi_0(x) + \Phi_2(x), \quad \Psi_s(x) = \Psi_0(x) + \Psi_2(x).$$

Бесконечные системы и сингулярное интегральное уравнение содержат неизвестные величины  $F_{mn}$  ( $m = 1, 2, \dots; n = 1, 2, \dots$ ).

Займемся определением этих величин. Для определения величины силы  $F_{mn}$  используем закон Гука. Для этого необходимо найти взаимное смещение точек  $z = mL + i(ny_0 - a_0)$  и  $z = mL - i(ny_0 - a_0)$  в рассматриваемой задаче. Используя соотношения [9], (4), (5), (6), после выполнения элементарных, хотя и несколько громоздких выкладок, найдем взаимное смещение  $\Delta u_{m,n}$  указанных точек.

Следовательно, искомые величины сосредоточенных сил определяются из решения бесконечной линейной системы уравнений относительно  $F_{pr}$  ( $p = 1, 2, \dots; r = 1, 2, \dots$ ):

$$F_{pr} = \frac{E_s A}{2ry_0} \Delta u_{pr} \quad (p = 1, 2, \dots; r = 1, 2, \dots). \quad (14)$$

В развернутом виде система (12) имеет вид

$$F_{pr} = \frac{E_s A}{4\pi(1+\chi)\mu h r y_0} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} F_{mn} \left[ \chi \ln \frac{(p-m)^2 L^2 + a_0^2}{(p-m)^2 L^2 + [(r-n)y_0 - a_0]^2} + \right. \\ \left. + \chi \ln \frac{(p+m)^2 L^2 + a_0^2}{(p+m)^2 L^2 + [(r-n)y_0 - a_0]^2} + \right. \\ \left. + \frac{2(r-n)y_0 [(r-n)y_0 - a_0] \langle 2p(p-m)L^2 + a_0 [(r-n)y_0 - a_0] \rangle}{\langle (p-m)^2 L^2 + [(r-n)y_0 - a_0]^2 \rangle [(p-m)^2 L^2 + a_0^2]} + \right]$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{2(r-n)y_0[(r-n)y_0 - a_0] \left\langle 2p(p+m)L^2 + a_0[(r-n)y_0 - a_0] \right\rangle}{\left\langle (p+m)^2 L^2 + [(r-n)y_0 - a_0]^2 \right\rangle \left[ (p+m)^2 L^2 + a_0^2 \right]} + \\
 & + \frac{2(r+n)y_0[(r+n)y_0 - a_0] \left\langle 2p(p-m)L^2 + a_0[(r+n)y_0 - a_0] \right\rangle}{\left\langle (p-m)^2 L^2 + [(r+n)y_0 - a_0]^2 \right\rangle \left[ (p-m)^2 L^2 + a_0^2 \right]} + \\
 & + \chi \ln \frac{(p-m)^2 L^2 + a_0^2}{(p-m)^2 L^2 + [(r+n)y_0 - a_0]^2} + \\
 & + \chi \ln \frac{(p+m)^2 L^2 + a_0^2}{(p+m)^2 L^2 + [(r+n)y_0 - a_0]^2} + \\
 & + \frac{2(r+n)y_0[(r+n)y_0 - a_0] \left\langle 2p(p+m)L^2 + a_0[(r+n)y_0 - a_0] \right\rangle}{\left\langle (p+m)^2 L^2 + [(r+n)y_0 - a_0]^2 \right\rangle \left[ (p+m)^2 L^2 + a_0^2 \right]} + \\
 & + \frac{E_s A \sigma_0 (\chi + 1)}{2y_0 r 4\mu} \left[ \alpha_0 (ry_0 - a_0)(\chi - 1) + (\chi + 1) \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{2k+2} \frac{\lambda^{2k+2} \sin(2k+1)\alpha}{(2k+1)\rho_2^{2k+1}} + \right. \\
 & \quad \left. + (\chi - 1) \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{2k+2} \lambda^{2k+2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{r_{j,k}}{2j+1} \rho_2^{2j+1} \sin(2j+1)\alpha - \right. \\
 & \quad \left. - \sum_{k=0}^{\infty} \beta_{2k+2} \frac{\lambda^{2k+2} \sin(2k+1)\alpha}{(2k+1)\rho_2^{2k+1}} - \sum_{k=0}^{\infty} \beta_{2k+2} \lambda^{2k+2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{r_{j,k}}{2j+1} \rho_2^{2j+1} \sin(2j+1)\alpha + \right. \\
 & \quad \left. + \sum_{k=0}^{\infty} (2k+2) \alpha_{2k+2} \lambda^{2k+2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(2j+2k+2)}{2j+1} r_{j,k} \rho_2^{2j+1} \sin(2j+1)\alpha + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{E_s A (\chi + 1)}{2y_0 r \mu} \frac{1}{2\omega} \int_L g(t) \left\langle \arctg \left[ \operatorname{ctg} \frac{\pi}{\omega} (t - pL) \operatorname{th} \frac{\pi}{\omega} (cy_0 - a_0) \right] - \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - \arctg \left[ \operatorname{tg} \frac{\pi pL}{\omega} \operatorname{th} \frac{\pi}{\omega} (cy_0 - a_0) \right] \right\rangle dt - \right. \\
 & \quad \left. - \frac{E_s A (cy_0 - a_0)}{2y_0 r \mu} \frac{1}{2\omega} \int_L g(t) \left[ \frac{\sin^2 \alpha_1 (\operatorname{ch}^2 \alpha_1 + \operatorname{sh}^2 \alpha_1)}{\sin^2 \alpha_1 \operatorname{ch}^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_1 \operatorname{sh}^2 \alpha_1} \right] dt \right].
 \end{aligned}$$

Итак, полученная система (14), системы (11), (12) и сингулярное интегральное уравнение (13) связаны, и их необходимо решать совместно. Решая их, найдем искомую функцию  $g(x)$ , коэффициенты  $\alpha_{2k}$ ,  $\beta_{2k}$  и значения сосредоточенных сил  $F_{mn}(m = 1, 2, \dots; n = 1, 2, \dots)$ .

Учитывая, что  $g(x) = -g(-x)$ , а также воспользовавшись разложением функции  $\operatorname{ctg} \frac{\pi}{\omega} z$ , уравнение (13) можно привести к следующему виду:

$$\frac{2}{\pi} \int_a^b \frac{tg(t)}{t^2 - x^2} dt + \frac{1}{\pi} \int_a^b K_*(t, x) g(t) dt + H(x) = 0, \quad (15)$$

$$K_*(t, x) = K(t, x) - K(-t, x),$$

$$K(t) = - \sum_{j=0}^{\infty} g_{j+1} \frac{t^{2j+1}}{\omega^{2j+1}}.$$

Сделаем замену переменных

$$t^2 = u = \frac{b^2 - a^2}{2} (\tau + 1) + a^2, \quad x^2 = u_0 = \frac{b^2 - a^2}{2} (\eta + 1) + a^2.$$

При этом отрезок интегрирования  $[a, b]$  переходит в отрезок  $[-1, 1]$ , а преобразованное сингулярное уравнение принимает стандартную форму:

$$\frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{p(\tau) d\tau}{\tau - \eta} + \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 p(\tau) B(\eta, \tau) d\tau + H(\eta) = 0. \quad (16)$$

Решение сингулярного уравнения (16) представим в виде

$$p(\eta) = \frac{p_0(\eta)}{\sqrt{1 - \eta^2}}.$$

Использование квадратурных формул [10] позволяет свести основные уравнения (сингулярное уравнение (16), алгебраические системы) к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений относительно приближенных значений  $p_k^0 = p_0(\eta_k)$  искомой функции в узловых точках, коэффициентов  $\alpha_{2k}$ ,  $\beta_{2k}$ , а также величин  $F_{mn}$ . При этом целесообразно из выражения для  $H(\eta)$  и системы исключить постоянные  $\beta_{2k}$ .

К полученной системе необходимо присоединить дополнительное условие (7), которое в дискретной форме имеет вид

$$\sum_{v=1}^M \frac{p_v^0}{\sqrt{\frac{b^2 - a^2}{2} (\tau_v + 1) + a^2}} = 0. \quad (17)$$

В механике хрупкого разрушения особый интерес представляет коэффициент интенсивности напряжений в окрестности концов трещины. Для коэффициента интенсивности напряжений у вершины трещины будем иметь формулу

$$K_I = - \lim_{x \rightarrow \infty} \left[ \sqrt{2\pi|x - \ell|} g(x) \right]. \quad (18)$$

Поскольку обе трещины находятся в одинаковых условиях, будем проводить дальнейшее исследование только для правой трещины, а все величины, относящиеся к левому и правому концам, обозначим индексами  $a$  и  $b$  соответственно. После нахождения функции  $g(x)$  (значений  $p_k^0$ ) можно определить коэффициент интенсивности напряжений в окрестности концов трещин следующими формулами:

$$K_I^a = \sqrt{\pi a} \sqrt{\frac{b^2 - a^2}{a^2}} \frac{1}{2M} \sum_{k=1}^M (-1)^k p_k^0 \operatorname{tg} \frac{\theta_k}{2}, \quad (19)$$

$$K_I^b = \sqrt{\pi b} \sqrt{\frac{b^2 - a^2}{b^2}} \frac{1}{2M} \sum_{k=1}^M (-1)^k p_k^0 \operatorname{ctg} \frac{\theta_k}{2}, \quad (20)$$

$$\theta_k = \frac{2k-1}{2M} \pi \quad (k = 1, 2, \dots, M).$$

Соотношения (19) и (20) получены с учетом использованных формул, замены переменных, формулы (18) и интерполяционного многочлена Лагранжа для функции  $p_0(\eta)$ .

Полученные системы должны решаться совместно. После решения этих систем по формулам (19), (20) вычисляются коэффициенты интенсивности напряжений в зависимости от длины трещины, а также от упругих и геометрических параметров подкрепленной панели. Затем, используя критерий хрупкого разрушения Гриффитса – Ирвина  $K_I = K_c$  ( $K_c$  – постоянная, характеризующая сопротивление материала распределению в нем трещин), найдем зависимость предельной нагрузки  $\sigma_0^a$ ,  $\sigma_0^b$  от длины трещины, а также от упругих и геометрических характеристик рассматриваемой пластины.

#### Анализ решения

Для численной реализации изложенного способа были проведены расчеты методом Гаусса с выбором главного элемента. Полагалось  $M = 30$ ,  $M = 40$ , что отвечает разбиению интервала  $[-1, 1]$  на 30, 40 чебышевских узлов соответственно.

Оказалось, что решение линейных систем совпадает с точностью до четвертого знака.

Были проведены расчеты по определению коэффициентов интенсивности напряжений. Для коэффициентов интенсивности напряжений имеем:

$$K_I^a = \sigma_0 \sqrt{\pi a} \sqrt{\left(\frac{b}{a}\right)^2 - 1} \cdot F_2(\lambda, a, b, \varepsilon), \quad (21)$$

$$K_I^b = \sigma_0 \sqrt{\pi b} \sqrt{\left(\frac{b}{a}\right)^2 - 1} \cdot F_1(\lambda, a, b, \varepsilon).$$

Расчеты для функций  $F_1(\lambda, a, b, \varepsilon)$  и  $F_2(\lambda, a, b, \varepsilon)$  проводились при изменении расстояния  $a$  для следующих значений свободных параметров  $a_0/L = 0,01$ ,  $\nu = 0,3$ ,  $\varepsilon = y_0/L = 0,15; 0,25; 0,5$ ,  $N = 5$ .

В расчетах длина трещин принималась постоянной  $b - a = 0,3$ .

Ребра жесткости считались выполненными из композита Al-сталь, ( $V_f = 40\%$ ), а пластина из сплава В95:  $E = 7,1 \cdot 10^4$  МПа,  $E_s = 11,5 \cdot 10^4$  МПа.

На основании результатов расчета можно сделать некоторые выводы. Как известно, трещина устойчива, если напряжение  $\sigma_0$ , необходимое для ее поддержания в подвижно-равновесном состоянии, возрастает с увеличением длины трещины. Условие устойчивого роста трещины имеет вид

$$\frac{\partial K_I}{\partial \ell} < 0.$$

Исследование показало, что рост трещины нормального разрыва вначале происходит неустойчиво (величина  $K_I$  возрастает), а затем, когда трещина приближается к стрингеру (зоне сжимающих напряжений), становится устойчивым.

При большом удалении вершины трещины от элемента жесткости уменьшение интенсивности напряжений при вершине трещины невелико, поэтому эффективность ребра жесткости, как элемента конструкции, воспринимающего часть нагрузки, действующей на пластину, уменьшается. При приближении вершины трещины к ребру жесткости это уменьшение становится все более весомым.

Степень уменьшения тем больше, чем выше жесткость подкрепляющего элемента и чем ближе расположены точки соединения между собой. Основываясь на полученных результатах, можно считать, что приклепанные подкрепляющие стрингеры могут служить весьма эффективным средством, задерживающим рост трещины и позволяющим значительно продлить срок эксплуатации тонкостенной конструкции (панели).

### Выводы

Развита эффективная методика решения плоской задачи механики разрушения для клепаной перфорированной панели, ослабленной двумя трещинами, находящимися вблизи контура каждого кругового отверстия. Для подкрепленной перфорированной панели, ослабленной двумя прямолинейными трещинами вблизи каждого отверстия, найдена зависимость длины трещины от приложенной растягивающей нагрузки, числа и взаимного расположения ребер жесткости, отверстий, точек крепления и других физических и геометрических параметров клепаной панели. Изучено влияние взаимного расположения системы трещин отверстий, ребер жесткости и точек крепления на критерий роста трещин. В зависимости от геометрических и физических параметров перфорированной клепаной панели при взаимодействии системы трещин, отверстий и ребер жесткости наблюдается устойчивое развитие трещин.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Партон В.З., Морозов Е.М.* Механика упругопластического разрушения. Москва : Наука, 1985. 504 с.
2. *Dowrick G., Cartwright D.J., Rooke D.P.* The effects of repair patches on the stress distribution in a cracked sheet // Numerical Methods in Fracture Mechanics: Proceedings of the 2nd Int. Conf., Swansea. 1980. P. 763–775.
3. *Kravets V.S.* Effect of breaks in riveted stringers on the elastic and limiting equilibrium of a cracked plate // Materials Science. 1999. V. 35. I. 3. P. 339–348.
4. *Mir-Salim-zadeh M.V.* Fracture of an isotropic medium strengthened with a regular system of stringers // Mechanics of Composite Materials. 2007. V. 43. I. 1. P. 41–50.
5. *Мир-Салим-заде М.В.* Рост когезионной трещины в стрингерной пластине // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2013. № 4. С. 16–22.
6. *Мир-Салим-заде М.В.* Периодическая контактная задача для стрингерной пластины // Тяжелое машиностроение. 2015. № 6. С. 35–39.
7. *Mir-Salim-zadeh M.V.* Contact problem for a stringer plate weakened by a periodic system of variable width slots // Structural Engineering and Mechanics. 2017. V. 62. № 6. P. 719–724.



8. Bedair O. Analysis and limit state design of stiffened plated and shells: A world view // *Applied Mechanics Reviews*. ASME. 2009. V. 62. 12, 020501 (16 p.).
9. Дударьков Ю.И., Лимонин М.В., Левченко Е.А. Некоторые особенности оценки несущей способности стрингерных панелей из ПКМ // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2019. Т. 25. № 2. С. 192–206.
10. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. Москва : Наука, 1966. 707 с.

#### REFERENCES

1. Parton V.Z., Morozov E.M. *Mekhanika uprugoplasticheskogo razrusheniya* [Elastoplastic fracture mechanics]. Moscow: Nauka, 1985. 504 p. (rus)
2. Dowrick G., Cartwright D.J., Rooke D.P. The effects of repair patches on the stress distribution in a cracked sheet. *Proc. 2nd Int. Conf. "Numerical Methods in Fracture Mechanics"*. Swansea, 1980. Pp. 763–775.
3. Kravets V.S. Effect of breaks in riveted stringers on the elastic and limiting equilibrium of a cracked plate. *Materials Science*. 1999. V. 35. Pp. 339–348.
4. Mir-Salim-zade M.V. Fracture of an isotropic medium strengthened with a regular system of stringers. *Mechanics of Composite Materials*. 2007. V. 43. Pp. 41–50.
5. Mir-Salim-zade M.V. Rost kogeziionnoi treshchiny v stringernoi plastine [Cohesive crack growth in a stringer plate]. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2013. No. 4. Pp. 16–22. (rus)
6. Mir-Salim-zade M.V. Periodicheskaya kontaktnaya zadacha dlya stringernoi plastiny [Periodic contact problem for stringer plate]. *Tyazheloe mashinostroenie*. 2015. No. 6. Pp. 35–39. (rus)
7. Mir-Salim-zade M.V. Contact problem for a stringer plate weakened by a periodic system of variable width slots. *Structural Engineering and Mechanics*. 2017. V. 62. Pp. 719–724.
8. Bedair O. Analysis and limit state design of stiffened plated and shells: A world view. *Applied Mechanics Reviews*. ASME. 2009. V. 62. 12, P. 020501.
9. Dudarkov Yu.I.I., Limonin M.V.I., Levchenko E.A. Nekotorye osobennosti otsenki nesushchei sposobnosti stringernykh panelei iz PKM [Bearing capacity of carbon fiber reinforced polymer stringer plates]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*. 2019. V. 25. No. 2. Pp. 192–206. (rus)
10. Muskhelishvili N.I. Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoi teorii uprugosti [Basic problems of mathematical theory of elasticity]. Moscow: Nauka, 1966. 707 p. (rus)

#### Сведения об авторе

Яхьяев Джосгун Дунямин оглу, аспирант, Азербайджанский технический университет, AZ1073, Азербайджан, г. Баку, пр. Г. Джавида, 25, [neftoil.az@rambler.ru](mailto:neftoil.az@rambler.ru)

#### Author Details

Joshgun D. Yakhyayev, Research Assistant, Azerbaijan Technical University, 25, H. Javid Ave., Baku, Azerbaijan, [neftoil.az@rambler.ru](mailto:neftoil.az@rambler.ru)

УДК 624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-114-125

*Л.С. ЛЯХОВИЧ<sup>1</sup>, П.А. АКИМОВ<sup>1,2,3</sup>, Б.А. ТУХФАТУЛЛИН<sup>1</sup>,**<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет,**<sup>2</sup>Национальный исследовательский**Московский государственный строительный университет,**<sup>3</sup>Российская академия архитектуры и строительных наук*

**ОЦЕНКА БЛИЗОСТИ К ПРОЕКТУ  
МИНИМАЛЬНОЙ МАТЕРИАЛОЕМКОСТИ РЕШЕНИЯ  
ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ШИРИНЫ  
КУСОЧНО-ПОСТОЯННЫХ УЧАСТКОВ ПОЛКИ  
СТЕРЖНЕЙ ДВУТАВРОВОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ  
ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ ПО УСТОЙЧИВОСТИ  
ИЛИ НА ВЕЛИЧИНУ ПЕРВОЙ ЧАСТОТЫ  
СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ  
С УЧЁТОМ ТРЕБОВАНИЙ ПРОЧНОСТИ**

В одной из предыдущих работ авторов данной статьи рассматривалась задача об оценке близости решения к проекту минимальной материалоемкости при оптимизации ширины полок стержней двутаврового поперечного сечения при ограничениях по устойчивости или величине первой частоты собственных колебаний с учётом требований прочности в случае непрерывного изменения варьируемых параметров по длине стержня. При этом известно, что в строительной практике в основном стержни проектируются с кусочно-постоянным изменением параметров сечения. В другой статье авторов был сформулирован критерий оценки оптимальных решений при формировании кусочно-постоянных участков полки стержней двутаврового сечения при ограничениях по устойчивости или величине первой частоты собственных колебаний, но без учёта требований прочности. В данной статье рассматривается более общая задача об оценке оптимальных решений при формировании кусочно-постоянных участков ширины полок стержней двутаврового сечения при ограничениях по устойчивости или величине первой частоты собственных колебаний, но с учётом требований прочности и некоторых конструктивных ограничений.

**Ключевые слова:** критерий; оптимизация; устойчивость; частота; критическая сила; формы потери устойчивости; формы собственных колебаний; приведённые напряжения; кусочно-постоянное изменение параметров; минимальная материалоемкость.

**Для цитирования:** Ляхович Л.С., Акимов П.А., Тухфатуллин Б.А. Оценка близости к проекту минимальной материалоемкости решения об оптимизации ширины кусочно-постоянных участков полки стержней двутаврового поперечного сечения при ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний с учётом требований прочности // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 4. С. 114–125.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-114-125

L.S. LYAKHOVICH<sup>1</sup>, P.A. AKIMOV<sup>1,2,3</sup>, B.A. TUKHFATULLIN<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Tomsk State University of Architecture and Building,

<sup>2</sup>The National Research Moscow State University of Civil Engineering,

<sup>3</sup>Russian Academy of Architecture and Construction Sciences

## ESTIMATED CLOSENESS OF OPTIMUM PIECEWISE CONSTANT SECTION WIDTH IN I-RODS WITH STABILITY OR FIRST EIGEN-FREQUENCY LIMITS TO THE PREDICTED MINIMUM MATERIAL CONSUMPTION WITH REGARD TO STRENGTH REQUIREMENTS

The previous research described estimated closeness of optimum piecewise constant section width in I-rods with stability or first eigen-frequency limits to the predicted minimum material consumption with regard to strength requirements in continuous change in variable rod parameters. It is however known that in construction, rods are generally designed with piecewise constant change in the section parameters. Besides, in another work, the criterion was formulated for assessment of optimum solutions of piecewise constant sections of I-rods with stability or the first eigen-frequency limits, without considering the strength requirements. This paper focuses on a more general problem of estimated closeness of optimum piecewise constant section width in I-rods with stability or first eigen-frequency limits to the predicted minimum material consumption with regard to strength requirements.

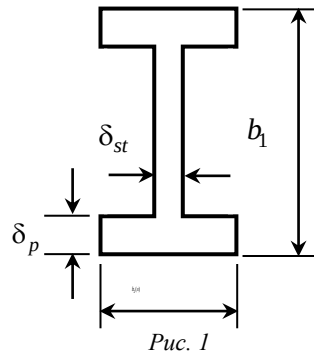
**Keywords:** criterion; optimization; stability; frequency; critical force; stability loss; eigen-frequency mode; reduced stresses; piecewise constant parametric variation; minimum material consumption.

**For citation:** Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Otsenka blizosti k projektu minimal'noi materialoemkosti resheniya ob optimizatsii shiriny kusochno-postoyannykh uchastkov polki sterzhnei dvutavrovogo poperechnogo secheniya pri ogranicheniyakh po ustoychivosti ili na velichinu pervoi chastoty sobstvennykh kolebaniy s uchetom trebovaniy prochnosti [Estimated closeness of optimum piecewise constant section width in I-rods with stability or first eigen-frequency limits to the predicted minimum material consumption with regard to strength requirements]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 4. Pp. 114–125.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-114-125

При решении оптимизационных задач [1–7] часто за признак достижения экстремума принимаются достаточно малые изменения функции цели на этапах вычислений. Известны случаи, когда данный признак приводит к решению, которое значительно отличается от оптимального. Указанное обстоятельство подтверждает актуальность работ – работ, в которых вместе с анализом изменений в процессе вычислений приращений функции цели формулируются и используются критерии, оценивающие близость полученных решений к оптимуму.

Так в работах [8–10] рассматривалась задача об оптимизации очертания ширины полок двутаврового поперечного сечения стержня, нагруженного продольной силой и несущего распределённую массу, при ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний. Обозначения размеров сечения приведены на рис. 1. В процессе оптимизации вы-



сота сечения  $b_1$ , толщина стенки  $\delta_{st}$ , толщина полки  $\delta_p$  не варьируются. Варьируется функция  $b_2(x)$  изменения ширины полок.

Функция цели записывается в виде

$$V_0 = 2 \int_0^l b_2(x) \delta_p \cdot dx \quad (1)$$

или при дискретной модели стержня из  $n$  участков

$$V_0 = 2(l/n) \sum_{i=1}^n b_2[i] \delta_p. \quad (1a)$$

Ограничение по устойчивости записывается в виде

$$P \leq P_{kp}, \quad (2)$$

а на величину первой частоты собственных колебаний – в виде

$$\omega_0 \leq \omega_1. \quad (3)$$

Поясним используемые в (1) – (3) обозначения:  $V_0$  – объём материала полки;  $P$  – действующая (приложенная) сила;  $P_{kp}$  – критическая сила для стержня;  $\omega_0$  – некоторая заданная величина;  $\omega_1$  – значение первой частоты собственных колебаний системы. Требуется отыскать функцию  $b_2(x)$ , доставляющую минимум объёму материала полок  $V_0$  при условии выполнения ограничений (2), (3). Решение этой задачи может быть выполнено одним из известных методов оптимизации.

В упомянутых выше работах [8–10], а также в статьях [13, 14] сформулированы критерии, оценивающие близость полученных в ходе оптимизации оптимизационных решений представленной выше задачи к оптимуму.

В работе [8] предложен критерий, который позволяет оценить близость полученного оптимизационного решения к минимально материалоемкому проекту. Один из вариантов записи критерия имеет вид:

$$\bar{\sigma}_{1\omega}^2(x) = \sigma_{1\omega}^2(x) b_1 - \sigma_{1\omega}^2(x) (b_1 - 2 \cdot \delta_p) - 3 \cdot E(\omega_0)^2 \rho \cdot 2 \cdot \delta_p \cdot v_{\omega}^2(x) = \text{const}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{1\omega}(x)$  и  $\sigma_{1\omega}(x)$  – соответственно нормальные напряжения в крайних волокнах двутаврового сечения и в волокнах на границе стенки и полки, вызываемые изгибающими моментами, возникающими при потере устойчивости или собственных колебаниях;  $E$  – модуль упругости материала стержня;  $\rho$  – удельная масса;  $v_{\omega}(x)$  – ординаты формы потери устойчивости или собственных колебаний.

Критерий (4) сформулирован при условии, что ширина полки  $b_2(x)$  двутавра изменяется непрерывно по длине стержня.

Как известно, во многих практически важных случаях конструкторы предпочитают кусочно-постоянное изменение варьируемой величины.

В работе [9] сформулирован критерий, позволяющий оценивать результаты решений об оптимизации ширины полки при ограничениях по устойчивости или величины первой частоты собственных колебаний, но при кусочно-постоянном изменении размеров  $b_2[i]$   $i=1,2,\dots,n$ , где  $n$  – количество участков кусочно-постоянного изменения ширины полки. Длины участков изменения полки  $l_u[i]$ , координаты правых краёв участков  $x[i]$ , а также левого края стержня  $x[0]$  считаются заданными. Один из вариантов записи критерия представлен в виде:

$$S_1[i] = \frac{1}{l_k[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} [\sigma_{1\omega}^2(x)b_1 - \sigma_{1\omega}^2(x)(b_1 - 2\delta_p) - 3E(\omega_0)^2 \rho \cdot 2\delta_p \cdot v_\omega^2] dx = \text{const.} \quad (5)$$

Задачи, для которых сформулированы критерии в работах [8, 9], не учитывали условий прочности, вследствие чего полученные при этом оптимизационные решения могли этим условиям не удовлетворять. Очевидно, что если после оптимизации изменить полученный проект так, чтобы выполнялись ранее не учтённые в ходе оптимизации ограничения, то условия оптимальности будут нарушены.

В работе [10] предлагается в процессе оптимизации очертания полок, непрерывно меняющихся по длине стержня двутаврового сечения, учитывать, помимо ограничений по устойчивости или величины первой частоты собственных колебаний, ещё и условия прочности, а также некоторые конструктивные ограничения.

Функция цели также записывается в виде (1), а при использовании дискретной модели в виде (1а).

Ограничения по устойчивости записываются в виде (2), а ограничения на величину первой частоты собственных колебаний – в виде (3).

Следует отметить, что для оценки выполнения ограничений (2), (3) используется критерий (4).

Как известно, для стержней двутаврового поперечного сечения должны выполняться три условия прочности [11]:

– для крайних волокон имеем ограничение на нормальные напряжения:

$$\sigma(x) \leq R, \quad (6)$$

где  $\sigma(x)$  – нормальные напряжения, вызванные нагрузкой в крайних волокнах стержня;  $R$  – расчетное сопротивление материала конструкции;

– для места стыка полки со стенкой имеем ограничение на эквивалентные напряжения:

$$\sigma_{\text{эkv}}(x) = \sqrt{\sigma_p^2(x) + 3\tau_p^2(x)} \leq R, \quad (7)$$

где  $\sigma_{\text{эkv}}(x)$ ,  $\sigma_p(x)$ ,  $\tau_p(x)$  – соответственно эквивалентные, нормальные и касательные напряжения, вызванные нагрузкой в месте стыка полки со стенкой;

– для уровня центра тяжести сечения имеем ограничение на эквивалентные напряжения:

$$\sigma_{\text{экв}}(x) = \sqrt{\sigma_0^2(x) + 3\tau_0^2(x)} \leq R, \quad (8)$$

где  $\sigma_{\text{экв}}(x)$ ,  $\sigma_0(x)$ ,  $\tau_0(x)$  – соответственно эквивалентные, нормальные и касательные напряжения, вызванные нагрузкой в центре тяжести сечения.

Для условий (7) и (8) использована четвёртая теория прочности.

Конструктивные ограничения на ширину полки в работе [10] приняты в виде

$$b_2(x) \geq bb, \quad (9)$$

где  $bb$  – минимально допустимые размеры ширины полки.

При использовании дискретной модели стержня соответствующие координаты сечения –  $(x)$  заменяются с точки зрения обозначений номером участка модели  $[i]$ .

В целях обеспечения единообразия использования критериев и ограничений для оценки близости полученного в результате оптимизации проекта к минимально материалоемкому критерию (4) и (5), условия (6), (7), (8) и (9) нормированы так, чтобы при их выполнении в виде равенств они бы принимали величину, равную единице.

Для нормирования критерия (4) или (5) изгибающие моменты определяются по форме потери устойчивости или по первой форме собственных колебаний с точностью до постоянного множителя. По найденным моментам в сечениях стержня вычисляются напряжения  $\sigma_{10}(x)$ ,  $\sigma_{10f}(x)$ ,  $\bar{\sigma}_{10f}^2(x)$ . Затем среди значений  $\bar{\sigma}_{10f}^2(x)$  выбирается наибольшее, и на него делятся величины, вычисленные по (4) или по (5).

Таким образом, если полученный в результате оптимизации проект является минимально материалоемким, то критерий принимает вид

$$\bar{\sigma}_{10f}^2(x) \leq 1. \quad (10)$$

Если при оптимизации использовались ещё и ограничения (6), (7), (8) и (9), то критерий (10) относится только к тем участкам стержня, на которых зависимости (6), (7), (8) и (9) выполняются в виде строгих неравенств.

Нормирование ограничений (6), (7) и (8) выполняется делением обеих частей соответствующих неравенств на величину  $R$ :

$$R1(x) = \frac{\sigma(x)}{R} \leq 1, \quad (11)$$

$$R2(x) = \frac{\sigma_{\text{экв}}(x)}{R} = \frac{\sqrt{\sigma_p^2(x) + 3\tau_p^2(x)}}{R} \leq 1, \quad (12)$$

$$R3(x) = \frac{\sigma_{\text{экв}}(x)}{R} = \frac{\sqrt{\sigma_0^2(x) + 3\tau_0^2(x)}}{R} \leq 1. \quad (13)$$

Для нормирования ограничения (9) обе части его выражения делятся на  $b_2(x)$  и записываются в виде

$$bb_0(x) = \frac{bb}{b_2(x)} \leq 1. \quad (14)$$

В [10] через  $\bar{\sigma}_{\text{tot}}^2(x)$ ,  $R1(x)$ ,  $R2(x)$ ,  $R3(x)$  и  $bb_0(x)$  обозначены соответственно показатели выполнения ограничений (2), (3), (6), (7), (8) и (9).

В соответствии с [10] **при непрерывном изменении варьируемого параметра  $b_2(x)$  близость к проекту минимальной материалоемкости проекта, полученного в результате оптимизации с учётом ограничений по устойчивости (или величине первой частоты собственных колебаний), ограничений по прочности и конструктивных, определяется близостью к единице **обязательно в каждом сечении** хотя бы одного из показателей (10), (11), (12), (13) и (14).**

Как известно, во многих практически важных случаях более предпочтительным является кусочно-постоянное изменение варьируемой величины.

В данной статье обобщаются результаты [9, 10] на случай кусочно-линейного изменения варьируемого параметра ширины полок  $b_2[i]$ .

Рассматривается задача об оценке близости к проекту минимальной материалоемкости оптимальных решений при кусочно-постоянных участках ширины полок стержней двутаврового сечения и ограничениях по устойчивости или величине первой частоты собственных колебаний, но с учётом требований прочности и некоторых конструктивных ограничений.

Выбор границ кусочно-постоянных участков изменения ширины полки определяется как технологическими требованиями, так и стремлением приблизиться к минимально материалоемкому проектному решению при принятых ограничениях, но при непрерывном изменении  $b_2[i]$  по длине стержня. После выбора границ участков размеры ширины полки определяются для каждого участка одним из методов оптимизации.

Для оценки близости этого решения к проекту минимальной материалоемкости при выбранных границах участков используем показатели выполнения ограничений по прочности (11), (12), (13), конструктивных ограничений (14), а вместо показателя (10) нормированный к единице критерий (5), который запишется в виде

$$S_1(x) \leq 1. \quad (15)$$

Как известно (например, [8, 12]), если в задаче оптимизации некоторые ограничения выполняются в виде равенств, то они относятся к активным, а если в виде неравенств, то к пассивным. По аналогии назовём показатели выполнения ограничений, величина которых близка к единице (математически «близость к единице», разумеется, оценивается с определенной заранее заданной точностью), активными, а показатели, не отвечающие принятым условиям близости, пассивными.

Достаточность близости показателей выполнения ограничений к единице устанавливается конструктором и может характеризоваться разностью между единицей и соответствующим показателем.

Показатель (15) вычисляется в пределах каждого участка как определённый интеграл. Поэтому его величина относится ко всему участку.

Поскольку на каждом участке ширина полки неизменна, то показатель (14) для всех сечений соответствующего участка одинаков.

Так как изгибающие моменты и поперечные силы, возникающие в стержне от нагрузки, изменяются по длине стержня, то и в сечениях между границами участков показатели (11), (12), (13) будут отличаться друг от друга.

Если показатель (14) или (15) на участке достаточно близок к единице, то он на этом участке активный. Остальные показатели во всех сечениях этого участка должны выполняться в виде нестрогих неравенств.

Если показатель (11), или (12), или (13) на каком-либо участке хотя бы в одном из сечений близок к единице, то он на этом участке активный. По ограничению, соответствующему этому показателю, определяется ширина полки. Несмотря на то, что активный показатель относится к одному сечению, но найденная по активному ограничению ширина полки определяет величину ширины полки во всех сечениях этого участка. Остальные показатели во всех сечениях этого участка должны выполняться в виде нестрогих неравенств.

Сформулируем *положение*, определяющее близость проекта оптимизации в рассматриваемой задаче к проекту минимальной материалоемкости:

**«Проект оптимизации ширины полки при выбранных границах кусочно-постоянных участков стержней двутаврового поперечного сечения и ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний, ограничениях по прочности и конструктивных будет достаточно близок к минимально материалоемкому, если на каждом участке хотя бы один из показателей (11), (12), (13) (14), (15) будет активным.**

Проиллюстрируем сформулированное положение на примере.

**Пример.** В [10] рассмотрен пример оптимизации ширины полок стержня двутаврового поперечного сечения при ограничениях на величину первой частоты собственных колебаний, ограничениях по прочности и конструктивных, но при непрерывном изменении варьируемого параметра  $b_2[i]$  по длине стержня. Для сопоставления результатов оптимизации при непрерывном и кусочно-постоянном изменении варьируемого параметра  $b_2[i]$  рассмотрим тот же пример. Схема стержня приведена на рис. 2, а.

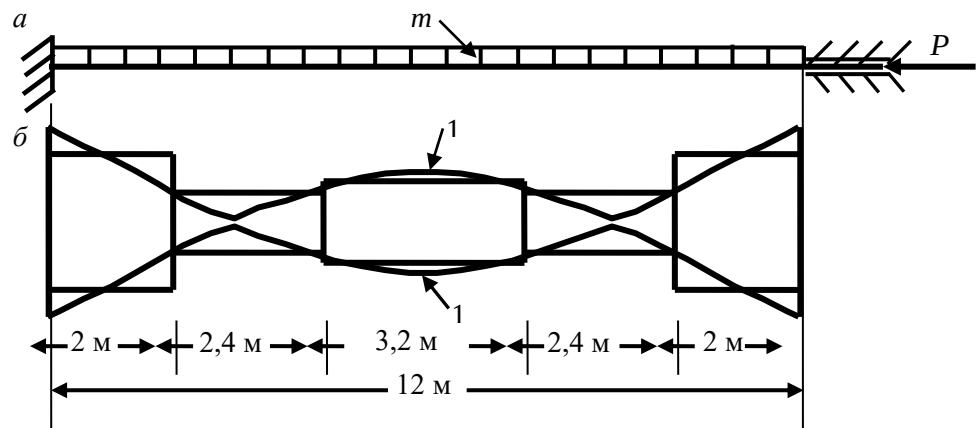


Рис. 2



Высота сечения стержня  $b_1 = 0,16$  м, толщина стенки  $b_{st} = 0,01$  м, толщина полки  $b_p = 0,014$  м. Модуль упругости материала стержня  $E = 206000000000$  н/м<sup>2</sup>, его удельная масса  $7850$  кг/м<sup>3</sup>, объемный вес  $77008,5$  н/м<sup>3</sup>, расчетное сопротивление материала  $R = 240000000$  н/м<sup>2</sup>. Стержень несёт равномерно распределённую массу интенсивностью  $m = 400$  кг/м. Эта же масса является внешней нагрузкой интенсивностью  $q = 3924$  н/м. При оптимизации с учётом условий прочности учитывается и собственный вес стержня.

Требуется оптимизировать значения ширины полок рассматриваемого стержня по участкам при  $P = 300000$  н, обеспечить величину первой частоты собственных колебаний  $\omega_1 \geq \omega_0 = 13$  с<sup>-1</sup> и минимальный объём материала полок. При оптимизации необходимо учитывать ограничения на величину первой частоты собственных колебаний (3), ограничения по прочности (6), (7), (8) и конструктивные ограничения (9). Примем так же, как и в [10], минимально возможную ширину полки  $bb = 0,01$  м.

Расчёты выполняются на основе дискретной модели стержня из 30 участков. Равномерно распределённая масса и нагрузка приведена к узлам. В дискретной модели имеем узловые массы  $m[i] = 160$  кг и нагрузки  $q[i] = 1569,6$  н. Масса и вес конструкции учитываются в процессе оптимизации. Оптимизация выполнялась методом случайного поиска. Результаты представлены в таблице. В первом столбце таблицы представлены номера сечений дискретной модели ( $i$ ). Во втором столбце приведены размеры ширины полок, полученные в результате оптимизации при непрерывном изменении варьируемого параметра  $b_2[i]$ . На рис. 2, б очертание ширины полок показано линиями 1.

| $i$ | $b_2[i]$ |        | Показатели оценки |         |         |           |          | $k$ |
|-----|----------|--------|-------------------|---------|---------|-----------|----------|-----|
|     |          |        | $R1[i]$           | $R2[i]$ | $R3[i]$ | $bb_0[i]$ | $S_1[k]$ |     |
| 1   | 2        | 3      | 4                 | 5       | 6       | 7         | 8        | 9   |
| 1   | 0,1995   | 0,1492 | 0,9871            | 0,8633  | 0,2685  | 0,0670    | 1,0000   | 1   |
| 2   | 0,1727   | 0,1492 | 0,8395            | 0,7419  | 0,2649  |           |          |     |
| 3   | 0,1444   | 0,1492 | 0,6990            | 0,6267  | 0,2613  |           |          |     |
| 4   | 0,1147   | 0,1492 | 0,5665            | 0,5180  | 0,2576  |           |          |     |
| 5   | 0,0837   | 0,1492 | 0,4425            | 0,4167  | 0,2537  |           |          |     |
| 6   | 0,0518   | 0,0701 | 0,5770            | 0,5490  | 0,3960  | 0,1427    | 0,3284   | 2   |
| 7   | 0,0254   | 0,0701 | 0,3897            | 0,3955  | 0,3934  |           |          |     |
| 8   | 0,0100   | 0,0701 | 0,5747            | 0,5449  | 0,3909  |           |          |     |
| 9   | 0,0321   | 0,0701 | 0,7385            | 0,6785  | 0,3886  |           |          |     |
| 10  | 0,0498   | 0,0701 | 0,8806            | 0,7947  | 0,3865  |           |          |     |
| 11  | 0,0675   | 0,0701 | 1,0000            | 0,8926  | 0,3847  |           |          |     |
| 12  | 0,0859   | 0,0970 | 0,8498            | 0,7560  | 0,3125  | 0,1031    | 1,0000   | 3   |
| 13  | 0,0998   | 0,0970 | 0,9046            | 0,8009  | 0,3111  |           |          |     |

Окончание таблицы

| $i$ | $b_2[i]$ |        | Показатели оценки |         |         |           |          | $k$ |
|-----|----------|--------|-------------------|---------|---------|-----------|----------|-----|
|     |          |        | $R1[i]$           | $R2[i]$ | $R3[i]$ | $bb_0[i]$ | $S_1[k]$ |     |
| 1   | 2        | 3      | 4                 | 5       | 6       | 7         | 8        | 9   |
| 14  | 0,1091   | 0,0970 | 0,9413            | 0,8309  | 0,3102  | 0,1031    | 1,0000   | 3   |
| 15  | 0,1138   | 0,0970 | 0,9597            | 0,8460  | 0,3098  |           |          |     |
| 16  | 0,1138   | 0,0970 | 0,9597            | 0,8460  | 0,3098  |           |          |     |
| 17  | 0,1091   | 0,0970 | 0,9413            | 0,8309  | 0,3102  |           |          |     |
| 18  | 0,0998   | 0,0970 | 0,9046            | 0,8009  | 0,3111  |           |          |     |
| 19  | 0,0859   | 0,0970 | 0,8498            | 0,7560  | 0,3125  |           |          |     |
| 20  | 0,0675   | 0,0701 | 1,0000            | 0,8926  | 0,3847  | 0,1427    | 0,3284   | 4   |
| 21  | 0,0498   | 0,0701 | 0,8806            | 0,7947  | 0,3865  |           |          |     |
| 22  | 0,0321   | 0,0701 | 0,7385            | 0,6785  | 0,3886  |           |          |     |
| 23  | 0,0100   | 0,0701 | 0,5747            | 0,5449  | 0,3909  |           |          |     |
| 24  | 0,0254   | 0,0701 | 0,3897            | 0,3955  | 0,3934  |           |          |     |
| 25  | 0,0518   | 0,0701 | 0,5770            | 0,5490  | 0,3960  |           |          |     |
| 26  | 0,0837   | 0,1492 | 0,4425            | 0,4167  | 0,2537  | 0,0670    | 1,0000   | 5   |
| 27  | 0,1147   | 0,1492 | 0,5665            | 0,5180  | 0,2576  |           |          |     |
| 28  | 0,1444   | 0,1492 | 0,6990            | 0,6267  | 0,2613  |           |          |     |
| 29  | 0,1727   | 0,1492 | 0,8395            | 0,7419  | 0,2649  |           |          |     |
| 30  | 0,1995   | 0,1492 | 0,9871            | 0,8633  | 0,2685  |           |          |     |

Данный пример приводится для иллюстрации возможности использования показателей выполнения ограничений (11), (12), (13) (14), (15) для оценки оптимального решения при кусочно-постоянном изменении ширины полки. В этой связи для достижения указанной цели ограничимся одним вариантом выбора границ участков. В примере принят вариант пяти участков.

Как уже отмечалось, выбор границ кусочно-постоянных участков изменения ширины полки определяется как технологическими требованиями, так и стремлением максимально приблизиться к минимально материалоёмкому решению при непрерывном изменении  $b_2[i]$  по длине стержня. Выбранные границы участков показаны на рис. 2. При выбранных границах участков оптимальные размеры ширины полки определялись методом случайного поиска. Результаты вычислений представлены в столбце 3 таблицы. В столбце 9 показаны номера участков постоянной жёсткости ( $k$ ). В столбцах 4, 5, 6, 7 и 8 приведены с точностью до четырёх знаков после запятой значения соответствующих показателей оценки выполнения ограничений.

Показатель (14) –  $bb_0[k]$  оказался пассивным на всех участках. Он выполняется для всех сечений в виде неравенств.

Показатель (15) –  $S_1[k]$  оказался активным на первом, третьем и пятом участках. На втором и четвертом участках он выполняется в виде неравенств.

Показатель (11) –  $R1[i]$  оказался активным в сечении 11 второго участка и в сечении 20 четвёртого участка. В остальных сечениях стержня показатель (11) выполняется в виде неравенств.

Показатели  $R2[i]$ ,  $R3[i]$  во всех сечениях стержня выполняются в виде неравенств. В таблице активные показатели выделены.

Итак, в данном примере *на каждом участке есть по одному активному показателю. При этом остальные показатели также выполняются, но в виде неравенств.*

Следовательно, результат оптимизации близок к минимально материалоемкому проекту при выбранных для рассмотренного примера границах участков.

Таким образом, в статье сформулировано положение об оценке близости проекта оптимизации ширины полки при выбранных границах кусочно-постоянных участков стержней двутаврового поперечного сечения и ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний с учётом ограничений по прочности и конструктивных требований к проекту минимальной материалоемкости.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Abd Elrehim M.Z., Eid M.A., Sayed M.G. Structural optimization of concrete arch bridges using Genetic Algorithms // Ain Shams Engineering Journal. 2019. V. 10. I. 3. P. 507–516.
2. Afzal M., Liu Y., Cheng J.C.P., Gan V.J.L. Reinforced concrete structural design optimization: A critical review // Journal of Cleaner Production. 2020. V. 260. 120623.
3. Belardi V.G., Fanelli P., Vivio F. Structural analysis and optimization of anisogrid composite lattice cylindrical shells // Composites Part B: Engineering. 2018. V. 139. P. 203–215.
4. Chen L.L., Lian H., Liu Z., Chen H.B., Atroshchenko E., Bordas S.P.A. Structural shape optimization of three dimensional acoustic problems with isogeometric boundary element methods // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2019. V. 355. P. 926–951.
5. Khan W., Siraj-ul-Islam, Ullah B. Structural optimization based on meshless element free Galerkin and level set methods // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2019. V. 344. P. 144–163.
6. Martin A., Deierlein G.G. Structural topology optimization of tall buildings for dynamic seismic excitation using modal decomposition // Engineering Structures. 2020. V. 216. 110717.
7. Nguyen L.C., Nguyen-Xuan H. Deep learning for computational structural optimization // ISA Transactions. 2020. V. 103. P. 177–191.
8. Ляхович Л.С. Особые свойства оптимальных систем и основные направления их реализации в методах расчета сооружений. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2009. 372 с.
9. Ляхович Л.С., Акимов П.А., Тухфатуллин Б.А. Критерий оценки оптимальных решений при формировании кусочно-постоянных участков полки стержней двутаврового поперечного сечения при ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 92–105.
10. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Assessment of the Proximity of Design to Minimum Material Capacity Solution of Problem of Optimization of the Flange Width of I-Shaped Cross-Section Rods with Allowance for Stability Constraints or Constraints for the Value of the First Natural Frequency and Strength Requirements // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций). 2020. V. 16. I. 2. P. 71–82.
11. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции (актуализированная редакция СНиП II-23–81\*). Москва : Минстрой РФ, 2017. 140 с.
12. Хедли Дж. Нелинейное и динамическое программирование. Москва : Мир, 1967. 507 с.

13. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Assessment Criteria of Optimal Solutions for Creation of Rods With Piecewise Constant Cross-Sections With Stability Constraints or Constraints for Value of the First Natural Frequency. Part 1: Theoretical Foundations // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019. V. 15. I. 4. P. 88–100.
14. Lyakhovich L.S., P.A. Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Assessment Criteria of Optimal Solutions for Creation of Rods With Piecewise Constant Cross-Sections With Stability Constraints or Constraints for Value of the First Natural Frequency. Part 2: Numerical Examples // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019. V. 15. I. 4. P. 101–110.

## REFERENCES

1. Abd Elrehim M.Z., Eid M.A., Sayed M.G. Structural optimization of concrete arch bridges using genetic algorithms. *Ain Shams Engineering Journal*. 2019. V. 10. I. 3. Pp. 507–516.
2. Afzal M., Liu Y., Cheng J.C.P., Gan V.J.L. Reinforced concrete structural design optimization: A critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2020. V. 260, article 120623.
3. Belardi V.G., Fanelli P., Vivio F. Structural analysis and optimization of anisogrid composite lattice cylindrical shells. *Composites Part B: Engineering*. 2018. V. 139. Pp. 203–215.
4. Chen L.L., Lian H., Liu Z., Chen H.B., Atroshchenko E., Bordas S.P.A. Structural shape optimization of three dimensional acoustic problems with isogeometric boundary element methods. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2019. V. 355. Pp. 926–951.
5. Khan W., Siraj-ul-Islam, Ullah B. Structural optimization based on meshless element free Galerkin and level set methods. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2019. V. 344. Pp. 144–163.
6. Martin A., Deierlein G.G. Structural topology optimization of tall buildings for dynamic seismic excitation using modal decomposition. *Engineering Structures*. 2020. V. 216. 110717.
7. Nguyen L.C., Nguyen-Xuan H. Deep learning for computational structural optimization. *ISA Transactions*. 2020. V. 103. Pp. 177–191.
8. Lyakhovich L.S. Osobyie svoystva optimal'nykh sistem i osnovnye napravleniya ikh realizatsii v metodakh rascheta sooruzhenii [Specific properties of optimum systems using methods of structural analysis]. Tomsk: TSUAB, 2009. 372 p. (rus)
9. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Kriterij ocenki optimal'nykh reshenij pri formirovanii kusochno-postoyannykh uchastkov sterzhnej dvutavrovogo poperechnogo secheniya pri ogranicheniyah po ustojchivosti ili velichiny pervoy chastoty sobstvnykh kolebaniy [Assessment criterion for optimum design solutions of piecewise constant sections in rods of I-shaped cross-section with stability or first eigen-frequency limits]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 92–105.
10. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Assessment of the proximity of design to minimum material capacity solution of problem of optimization of the flange width of I-shaped cross-section rods with allowance for stability constraints or constraints for the value of the first natural frequency and strength requirements. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2020. V. 16. I. 2. Pp. 71–82.
11. SNiP 16.13330.2017. Stal'nye konstruksii (aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-23-81\*) [Steel structures]. Moscow: Minstroj RF, 2017. 140 p. (rus)
12. Hadley G. Nelineinoe i dinamicheskoe programmirovaniye [Nonlinear and dynamic programming]. Moscow: Mir, 1967. 507 p. (transl. from Engl.)
13. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Assessment criteria of optimal solutions for creation of rods with piecewise constant cross-sections with stability constraints or constraints for value of the first natural frequency. Part 1: Theoretical foundations. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019. V. 15. I. 4. Pp. 88–100.
14. Lyakhovich L.S., P.A. Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Assessment criteria of optimal solutions for creation of rods with piecewise constant cross-sections with stability constraints or constraints for value of the first natural frequency. Part 2: Numerical examples. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019. V. 15. I. 4. Pp. 101–110.

**Сведения об авторах**

*Ляхович Леонид Семенович*, докт. техн. наук, профессор, академик Российской академии архитектуры и строительных наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, lls@tsuab.ru

*Акимов Павел Алексеевич*, докт. техн. наук, профессор, академик Российской академии архитектуры и строительных наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; главный ученый секретарь президиума, Российская академия архитектуры и строительных наук, 107031, г. Москва, ул. Большая Дмитровка, 24, стр. 1, akimov@raasn.ru

*Тухфатуллин Борис Ахатович*, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, bat9203@gmail.com

**Authors Details**

*Leonid S. Lyakhovich*, DSc, Professor, Academician RAACS, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, lls@tsuab.ru

*Pavel A. Akimov*, DSc, Professor, Academician RAACS, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; The National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, akimov@raasn.ru

*Boris A. Tukhfatullin*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, bat9203@gmail.com

УДК 539.375

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-126-139

*Д.Д. ЯХЬЯЕВ,**Азербайджанский технический университет*

## ИССЛЕДОВАНИЕ КЛЕПАНОЙ ПЕРФОРИРОВАННОЙ УПРУГОЙ ПАНЕЛИ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ ИЗ ИНОРОДНОГО МАТЕРИАЛА

Рассматривается задача теории упругости для бесконечной изотропной упругой пластины толщиной  $h$ , ослабленной периодической системой круговых отверстий. Круговые отверстия заполнены включениями из инородного упругого материала, спаянными вдоль обвода. К панели симметрично относительно поверхности приклепаны поперечные ребра жесткости из другого упругого материала. Упругая перфорированная панель подвергается однородному растягивающему напряжению (растяжение на бесконечности). Действие приклепанных подкрепляющих ребер в расчетной схеме моделируется неизвестными сосредоточенными силами, приложенными в местах расположения точек крепления.

**Ключевые слова:** упругая перфорированная клепаная панель; инородные упругие включения; одноосное растяжение; сосредоточенные силы; поперечные ребра жесткости.

**Для цитирования:** Яхьяев Д.Д. Исследование клепаной перфорированной упругой панели с включениями из инородного материала // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 4. С. 126–139.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-126-139

*J.D. YAKHYAEV,**Azerbaijan Technical University*

## ELASTIC RIVETED PERFORATED PLATE WITH FOREIGN INCLUSIONS

The paper focuses on the problem of the elasticity theory for an infinite isotropic elastic plate weakened by circular perforation. The perforated holes are filled with inclusions made of elastic material and sealed along the edges. Transverse stiffening ribs made of another elastic material are riveted to the panel symmetrically to the surface. The elastic perforated plate is subjected to uniform tensile stress (tension at infinity). The action of riveted reinforcing strengthening ribs is modeled by unknown concentrated forces applied to anchor points.

**Keywords:** elastic perforated riveted plate; foreign elastic inclusions; uniaxial tension; concentrated forces; transversal rib.

**For citation:** Yakhyayev J.D. Issledovanie klepanoi perforirovannoi uprugoi paneli s vklyucheniymi iz inorodnogo materiala [Elastic riveted perforated plate with foreign inclusions]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 4. Pp. 126–139.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-126-139

### Введение

В промышленном и гражданском строительстве, транспортном машиностроении и других отраслях производства для уменьшения материалоемко-

сти конструкций и изделий, повышения их прочности и жесткости, эксплуатационной надежности широко используют подкрепление пластины упругими элементами [1–8]. Пластины могут быть перфорированными. В строительстве широко используют перфорированные балки и тонкостенные профили листовых тонкостенных конструкций. Для практики важен случай, когда в отверстия клепаной панели впаены упругие шайбы из другого материала. Этот случай очень важен, т. к. к нему могут быть сведены задачи расчета на прочность клепаной перфорированной панели с трубками, проходящими через отверстия в панели и скрепленными с ней.

Представляет научный интерес оценка взаимодействия инородных упругих включений в клепаной перфорированной панели, исследование влияния расположения включений, ребер жесткости и точек крепления на напряженно-деформированное состояние панели.

### Постановка задачи

В отверстия клепаной панели впаены упругие шайбы из материала, отличного от материала панели. Рассматривается бесконечная изотропная упругая пластина толщиной  $h$ , ослабленная периодической системой круговых отверстий, имеющих радиус  $\lambda$ . Пусть центры этих отверстий находятся в точках

$$P_m = m\omega, \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots), \quad \omega = 2.$$

Круговые отверстия  $L_m$  ( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) заполнены шайбами из инородного упругого материала, спаянными вдоль обвода. К панели симметрично относительно поверхности приклепаны поперечные ребра жесткости в точках  $z = \pm mL \pm iny_0$  ( $m = 2k - 1$ ;  $k = 1, 2, \dots$ ;  $n = 1, 2, \dots$ ) из другого упругого материала, площадь сечения которых  $A$ , модуль Юнга  $E_s$ . Выбор системы координат и обозначения поясняются на рис. 1. На бесконечности действует однородное растягивающее напряжение  $\sigma_y^\infty = \sigma_0$  (растяжение до бесконечности). Действие приклепанных подкрепляющих ребер в расчетной схеме заменяется неизвестными сосредоточенными силами, приложенными в местах расположения точек крепления (рис. 1). Начало системы координат совмещаем с геометрическим центром отверстия  $L_0$  в панели.

На основании симметрии граничных условий задачи и геометрии области  $D$ , занятой упругой средой, компоненты тензора напряжений в плоскости являются периодическими функциями с основным периодом  $\omega$ .

При деформации пластины смежные точки контуров включений и плоскости будут иметь одинаковые перемещения, а усилия, действующие со стороны пластины на любую шайбу, будут равны по величине и противоположны по знаку усилиям, действующим на панель со стороны включения.

Так как решение для панели обладает свойством периодичности, достаточно рассмотреть условия сопряжения плоскости с включением лишь вдоль контура основного отверстия  $L_0$ .

Комплексные потенциалы, описывающие напряженно-деформированное состояние включения, обозначим через  $\Phi_b(z)$  и  $\Psi_b(z)$ , а потенциалы, относящиеся к панели, – через  $\Phi(z)$  и  $\Psi(z)$ .

Рассматриваемая задача сводится к отысканию двух пар функций  $\Phi(z)$ ,

$\Psi(z)$  и  $\Phi_b(z)$ ,  $\Psi_b(z)$  комплексного переменного  $z = x + iy$ , аналитических в областях, занятых средой и шайбой и удовлетворяющих граничным условиям [9]:

$$\begin{aligned} & \Phi(\tau) + \overline{\Phi(\tau)} - [\bar{\tau}\Phi'(\tau) + \Psi(\tau)]e^{2i\theta} = \\ & = \Phi_b(\tau) + \overline{\Phi_b(\tau)} - [\bar{\tau}\Phi'_b(\tau) + \Psi_b(\tau)]e^{2i\theta}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & -\chi\overline{\Phi(\tau)} + \Phi(\tau) - [\bar{\tau}\Phi'(\tau) + \Psi(\tau)]e^{2i\theta} = \\ & = \frac{\mu}{\mu_b} \left\{ \chi_b\overline{\Phi_b(\tau)} + \Phi_b(\tau) - [\bar{\tau}\Phi'_b(\tau) + \Psi_b(\tau)]e^{2i\theta} \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

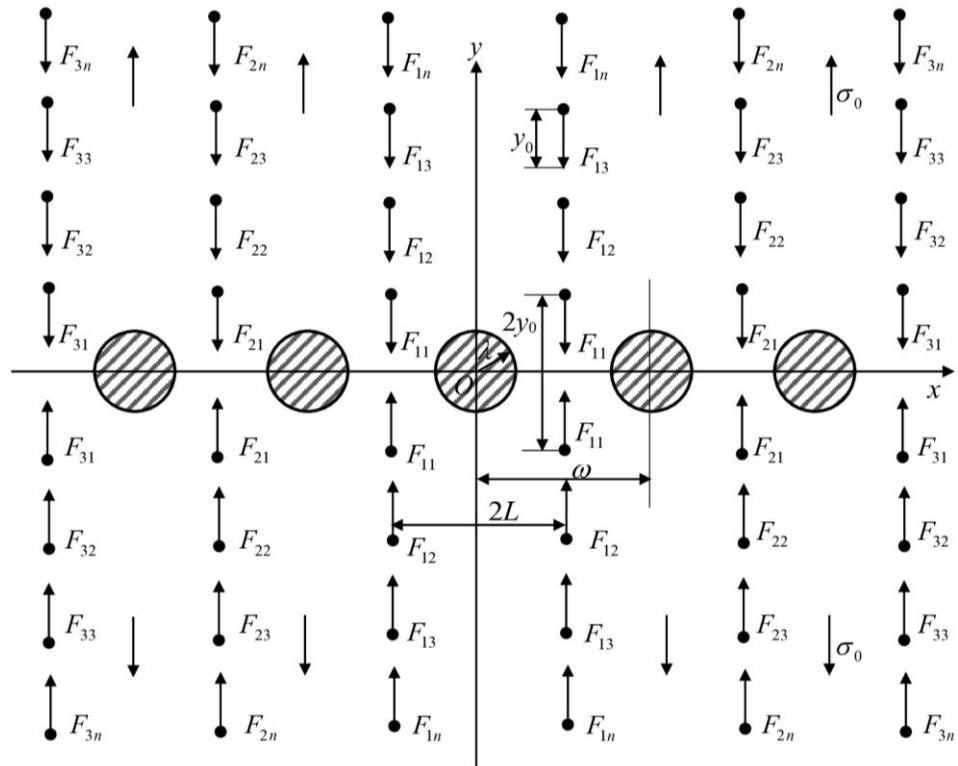


Рис. 1. Расчетная схема упругой клепаной перфорированной панели с инородными включениями

Условие (1) выражает, что силы, действующие с обеих сторон на элементы линии контакта, равны. Условие (2) выражает условие непрерывности перемещения на линии контакта.  $\chi_b$ ,  $\mu_b$  и  $\chi$ ,  $\mu$  – упругие постоянные материала шайбы и панели соответственно,  $\tau = \lambda e^{i\theta} + m\omega$  ( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ).

#### Решение краевой задачи

Обозначим левую часть краевого условия (1) через  $f_1(\theta) - if_2(\theta)$ :

$$\Phi(\tau) + \overline{\Phi(\tau)} - [\bar{\tau}\Phi'(\tau) + \Psi(\tau)]e^{2i\theta} = f_1 - if_2. \quad (3)$$



Пусть на контуре  $L_0$  ( $\tau = \lambda e^{i\theta}$ ) функция  $f_1 - if_2$  разлагается в ряд Фурье. В силу симметрии ряд Фурье этой функции имеет вид

$$f_1 - if_2 = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_{2k} e^{2ik\theta}, \quad \text{Im } A_{2k} = 0.$$

Комплексные потенциалы  $\Phi_0(z)$  и  $\Psi_0(z)$  аналитичны во внутренности круга  $|\tau| = \lambda$  и могут быть представлены рядами [9]:

$$\Phi_b(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{2k} z^{2k}, \quad \Psi_b(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{2k} z^{2k}. \quad (4)$$

На основании краевого условия (3) и соотношения в виде ряда Фурье для определения потенциалов  $\Phi_b(z)$  и  $\Psi_b(z)$  имеем на контуре  $L_0$  следующее граничное условие:

$$\Phi_b(\tau) + \overline{\Phi_b(\tau)} - [\bar{\tau}\Phi'_b(\tau) + \Psi_b(\tau)]e^{2i\theta} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_{2k} e^{2ik\theta}. \quad (5)$$

Напомним, что коэффициенты  $A_{2k}$  пока нам неизвестны.

Подставив (4) и граничное условие (5) на контуре включения и применяя процедуру метода степенных рядов, находим:

$$a_0 = \frac{A_0}{2}, \quad a_{2k} = \frac{A_{-2k}}{\lambda^{2k}} \quad (k = 1, 2, \dots), \quad (6)$$

$$c_{2k} = -(2k+1) \frac{A_{-2k-2}}{\lambda^{2k}} - \frac{A_{2k+2}}{\lambda^{2k}} \quad (k = 1, 2, \dots).$$

Потенциалы  $\Phi_b(z)$  и  $\Psi_b(z)$  позволяют, после некоторых преобразований, записать краевые условия на контуре  $L_0$  ( $\tau = \lambda e^{i\theta}$ ) для комплексных потенциалов  $\Phi(z)$  и  $\Psi(z)$  в следующем виде:

$$\Phi(\tau) + \overline{\Phi(\tau)} - [\bar{\tau}\Phi'(\tau) + \Psi(\tau)]e^{2i\theta} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_{2k} e^{2ki\theta}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \Phi(\tau) - \chi \overline{\Phi(\tau)} - [\bar{\tau}\Phi'(\tau) + \Psi(\tau)]e^{2i\theta} = \\ & = \frac{\mu}{\mu_b} \left[ A_0 \frac{(1-\chi_b)}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_{2k} e^{2ki\theta} - \chi_b \sum_{k=1}^{\infty} A_{2k} e^{-2ki\theta} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Для определения неизвестных пока величин  $A_{2k}$  ( $k = 0, \pm 1, \dots$ ) рассмотрим решение для панели.

Комплексные потенциалы  $\Phi(z)$  и  $\Psi(z)$  для упругой панели находим в виде

$$\Phi(z) = \Phi_0(z) + \Phi_1(z), \quad \Psi(z) = \Psi_0(z) + \Psi_1(z). \quad (9)$$

Представления для функций  $\Phi_0(z)$ ,  $\Psi_0(z)$  и  $\Phi_1(z)$ ,  $\Psi_1(z)$  имеют вид

$$\Phi_0(z) = \frac{1}{4} \sigma_0 - \frac{1}{2\pi(1+\chi)h} \sum_{m,n}' F_{mn} \left[ \frac{1}{z - mL + iny_0} - \frac{1}{z - mL - iny_0} \right],$$

$$\Psi_0(z) = \frac{1}{2}\sigma_0 - \frac{i\chi}{2\pi(1+\chi)h} \sum_{m,n} 'F_{mn} \left[ \frac{1}{z - mL + iny_0} - \frac{1}{z - mL - iny_0} \right] +$$

$$+ \frac{i}{2\pi(1+\chi)h} \sum_{m,n} 'F_{mn} \left[ \frac{Lm - iny_0}{(z - mL - iny_0)^2} - \frac{mL + iny_0}{(z - mL + iny_0)^2} \right],$$

где  $F_{mn}$  – сосредоточенные силы, приложенные в точках  $z = mL + iny_0$ ,  $\chi = (3 - \nu)/(1 + \nu)$ ;  $\nu$  – коэффициент Пуассона материала пластины.

$$\Phi_1(z) = \alpha_0 + \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{2k+2} \frac{\lambda^{2k+2} \rho^{(2k)}(z)}{(2k+1)!},$$

$$\Psi_1(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \beta_{2k+2} \frac{\lambda^{2k+2} \rho^{(2k)}(z)}{(2k+1)!} - \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{2k+2} \frac{\lambda^{2k+2} S^{(2k+1)}(z)}{(2k+1)!},$$

где

$$\rho(z) = \left( \frac{\pi}{\omega} \right)^2 \sin^{-2} \left( \frac{\pi}{\omega} z \right) - \frac{1}{3} \left( \frac{\pi}{\omega} \right)^2,$$

$$S(z) = \sum_{m,n} ' \left[ \frac{P_m}{(z - P_m)^2} - \frac{2z}{P_m} - \frac{1}{P_m} \right].$$

Приведем теперь зависимости, которым должны удовлетворять коэффициенты представлений (9). Из условий симметрии напряженного состояния в плоскости относительно координатных осей с учетом формулы Колосова – Мусхелишвили следует, что

$$\Phi(-z) = \Phi(z), \quad \Phi(\bar{z}) = \overline{\Phi(z)},$$

$$\Psi(-z) = \Psi(z), \quad \Psi(\bar{z}) = \overline{\Psi(z)}.$$

Отсюда находим, что

$$\operatorname{Im} \alpha_{2k+2} = 0, \quad \operatorname{Im} \beta_{2k+2} = 0, \quad k = 1, 2, \dots \quad (10)$$

Можно убедиться, что приведенные представления определяют класс симметричных задач с периодическим распределением напряжений.

Из условия постоянства главного вектора всех сил, действующих на дугу, соединяющую две конгруэнтные точки в  $D$ , занятой средой, следует

$$\alpha_0 = \frac{\pi^2}{24} \beta_2 \lambda^2.$$

Неизвестные функции  $\Phi_1(z)$ ,  $\Psi_1(z)$  и постоянные  $\alpha_{2k}$ ,  $\beta_{2k}$  и  $A_{2k}$  должны быть определены из граничных условий (1), (3).

Для составления уравнений относительно коэффициентов  $\alpha_{2k}$ ,  $\beta_{2k}$  функций  $\Phi_1(z)$ ,  $\Psi_1(z)$  представим краевое условие (7) в следующем виде:

$$\Phi_1(\tau) + \overline{\Phi_1(\tau)} - [\bar{\tau} \Phi_1'(\tau) + \Psi_1(\tau)] e^{2i\theta} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_{2k} e^{2ik\theta} + f_1^*(\theta) + i f_2^*(\theta), \quad (11)$$

где

$$f_1^*(\theta) + i f_2^*(\theta) = -\Phi_0(\tau) - \overline{\Phi_0(\tau)} + [\bar{\tau} \Phi_0'(\tau) + \Psi_0(\tau)] e^{2i\theta}. \quad (12)$$

Относительно функции  $f_1^*(\theta) + if_2^*(\theta)$  будем считать, что она разлагается на контуре  $L_0$  в ряд Фурье.

Подставив в левую часть краевого условия (11) вместо  $\Phi_1(z)$ ,  $\overline{\Phi_1(\tau)}$ ,  $\Phi_1'(\tau)$  и  $\Psi_1(z)$  их разложения в ряды Лорана в окрестности нулевой точки, а в правую часть (11) вместо  $f_1^* + if_2^*$  ряд Фурье и сравнивая коэффициенты при одинаковых степенях  $e^{i\theta}$ , получим две бесконечные системы алгебраических уравнений относительно коэффициентов  $\alpha_{2k}$ ,  $\beta_{2k}$ .

После некоторых преобразований приходим к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений относительно  $\alpha_{2k}$ :

$$\alpha_{2j+2} = \sum_{k=0}^{\infty} A_{j,k} \alpha_{2k+2} + b_j \quad (j = 0, 1, 2, \dots), \quad (13)$$

$$b_0 = A'_2 - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{g_{k+2} \cdot \lambda^{2k+4}}{2^{2k+4}} A'_{2k-2},$$

$$b_j = A'_{2j+2} - \frac{(2j+1)A'_0 g_{j+1} \lambda^{2j+2}}{k_1 2^{2j+2}} -$$

$$- \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(2j+2k+3)! g_{j+k+2} \lambda^{2k+2j+4}}{(2j)!(2k+3)! 2^{2j+2k+4}} A'_{-2k-2}, \quad (14)$$

$$A'_0 = A_0 + M_0, \quad A'_2 = A_2 + M_2,$$

$$A'_{2k} = A_{2k} + M_{2k} \quad (k = \pm 1, \pm 2, \dots),$$

$$M_0 = -\frac{1}{2} \sigma_0 - \frac{1}{\pi(1+\chi)h} \sum' F_{mn} \left( \frac{2ny_0}{(mL)^2 + (ny_0)^2} \right),$$

$$M_2 = \frac{1}{2} \sigma_0 - \frac{1}{\pi(1+\chi)h} \sum' F_{mn} \left[ \frac{\lambda^2 \sin 3\varphi_1}{\rho_1^3} + \frac{\chi \sin \varphi_1}{\rho_1} - \frac{\sin 3\varphi_1}{\rho_1} \right],$$

$$M_{2k} = \frac{1}{\pi(1+\chi)h} \sum' F_{mn} \left[ \frac{\lambda^{2k} \sin(2k+1)\varphi_1}{\rho_1^{2k+1}} + \frac{(-2)(-3)\dots(-2k)\lambda^{2k} \sin(2k+1)\varphi_1}{(2k-1)!\rho_1^{2k+1}} - \right. \\ \left. - \frac{\chi \lambda^{2k-2} \sin(2k-1)\varphi_1}{\rho_1^{2k-1}} + \frac{(-2)(-3)\dots(1-2k)\lambda^{2k-2} \sin(2k+1)\varphi_1}{(2k-2)!\rho_1^{2k+1}} \right] \quad (k = 2, 3, \dots),$$

$$M_{-2k} = \frac{1}{\pi(1+\chi)h} \sum' F_{mn} \frac{\lambda^{2k} \sin(2k+1)\varphi_1}{\rho_1^{2k+1}}, \quad (k = 1, 2, \dots),$$

$$\rho_1 = \sqrt{(mL)^2 + (ny_0)^2}, \quad \varphi_1 = \arctg \frac{ny_0}{mL}.$$

$$g_j = 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^4}, \quad k_1 = 1 - \frac{\pi^2}{12} \lambda^2, \quad k_2 = \frac{\pi^2}{24},$$

$$A_{j,k} = (2j+1) \gamma_{j,k} \lambda^{2k+2j+2},$$

$$\begin{aligned}\gamma_{j,k} = & -\frac{(2j+2k+2)!g_{j+k+1}}{(2j+1)!(2k+1)!2^{2j+2k+2}} + \frac{(2j+2k+4)!g_{j+k+2}\lambda^2}{(2j+2)!(2k+2)!2^{2j+2k+4}} + \\ & + \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(2j+2i+1)!(2k+2i+1)!g_{j+i+1}g_{k+i+1}\lambda^{4i+2}}{(2i+1)!(2j+1)!(2k+1)!(2i)!2^{2j+2k+4i+4}} + b_{j,k} \\ & b_{0,k} = 0, \quad b_{j,0} = 0, \\ & b_{j,k} = \frac{g_{j+1}g_{k+1}\lambda^2}{2^{2j+2k+4}} \left(1 + \frac{2k_2\lambda^2}{k_1}\right), \\ & (j = 1, 2, \dots), \quad (k = 1, 2, \dots).\end{aligned}$$

Постоянные  $\beta_{2k}$  определяются из следующих соотношений:

$$\beta_2 = \frac{1}{k_1} \left[ -A'_0 + 2 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{g_{k+1} \cdot \lambda^{2k+2}}{2^{2k+2}} \alpha_{2k+2} \right], \quad (15)$$

$$\beta_{2j+4} = (2j+3)\alpha_{2j+2} + \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(2j+2k+3)!g_{j+k+2}\lambda^{2j+2k+2}}{(2j+2)!(2k+1)!2^{2j+2k+4}} \alpha_{2k+2} - A'_{-2j-2}.$$

Преобразуем граничное условие (8) к следующему виду:

$$\Phi(\tau) - \chi \overline{\Phi(\tau)} - [\tau \Phi'(\tau) + \Psi(\tau)] e^{2i\theta} = F(\theta) + \varphi_1^*(\theta) + i\varphi_2^*(\theta), \quad (16)$$

$$\text{где} \quad F(\theta) = \frac{\mu}{\mu_b} \left[ A_0 \frac{(1-\chi_b)}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_{2k} e^{2ki\theta} - \chi_b \sum_{k=1}^{\infty} A_{2k} e^{-2ki\theta} \right], \quad (17)$$

$$\varphi_1^*(\theta) + i\varphi_2^*(\theta) = -\chi \overline{\Phi_0(\tau)} + \Phi_0(\tau) - [\tau \Phi'_0(\tau) + \Psi_0(\tau)] e^{2i\theta}. \quad (18)$$

Поступая с функциями (17), (18) и с граничными условиями (16), как это было сделано соответственно с функциями (12) и краевым условием (11), получим для определения коэффициентов  $\alpha_{2k}$  бесконечную линейную алгебраическую систему

$$\alpha_{2j+2} = \sum_{k=0}^{\infty} A_{j,k} \alpha_{2k+2} + b_j \quad (j = 0, 1, 2, \dots), \quad (19)$$

$$-\chi b_0 = A'_2 - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{g_{k+2} \cdot \lambda^{2k+4}}{2^{2k+4}} A'_{-2k-2}, \quad (20)$$

$$-\chi b_j = A'_{2j+2} - \frac{(2j+1)A'_0 g_{j+1} \lambda^{2j+2}}{k_1 2^{2j+2}} -$$

$$- \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(2j+2k+3)!g_{j+k+2}\lambda^{2k+2j+4}}{(2j)!(2k+3)!2^{2j+2k+4}} A'_{-2k-2},$$

$$A'_0 = -A_0 \frac{(\chi_b - 1)\mu}{2\mu_b} + M'_0, \quad A'_{2k} = \frac{\mu}{\mu_b} A_{2k} + M'_{2k},$$

$$A'_{-2k} = -\chi_b \frac{\mu}{\mu_b} A_{-2k} + M'_{-2k},$$

$$\begin{aligned}
k_1 &= 1 - (1 - \chi) \frac{\pi^2}{12} \lambda^2, \quad k_2 = \frac{\pi^2}{24}, \\
-\chi A_{j,k} &= (2j+1) \gamma_{j,k} \lambda^{2j+2k+2}, \\
\gamma_{0,0} &= \frac{3}{8} g_2 \lambda^2 - \chi \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(2i+1) g_{i+1}^2 \lambda^{4i+2}}{2^{4i+4}}, \\
\gamma_{j,k} &= -\frac{(2j+2k+2)! g_{j+k+1}}{(2j+1)!(2k+1)! 2^{2j+2k+2}} + \frac{(2j+2k+4)! g_{j+k+2} \lambda^2}{(2j+2)!(2k+2)! 2^{2j+2k+4}} + \\
&\quad - \chi \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(2j+2i+1)!(2k+2i+1)! g_{j+i+1} g_{k+i+1} \lambda^{4i+2}}{(2i+1)!(2j+1)!(2k+1)!(2i)! 2^{2j+2k+4i+4}} + b_{j,k}, \\
b_{0,k} &= 0, \quad b_{j,0} = 0, \\
b_{j,k} &= \frac{g_{j+1} g_{k+1} \lambda^2}{2^{2j+2k+4}} \left( 1 + \frac{(1-\chi)^2 k_2 \lambda^2}{k_1} \right), \\
(j &= 1, 2, \dots), \quad (k = 1, 2, \dots).
\end{aligned}$$

Величины  $M'_{2k}$  определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
M'_0 &= M_0 + \frac{(\chi+1)}{4} \sigma_0, \\
M'_2 &= M_2, \quad M'_{2k} = M_{2k} \quad (k = 1, 2, \dots), \\
M'_{-2} &= M_{-2} - \frac{\lambda^2}{\pi h} \sum_{m,n} F_{mn} \frac{\sin 3\varphi_1}{\rho_1^3}, \\
M'_{-2k} &= M_{-2k} - \frac{\lambda^2}{\pi h} \sum_{m,n} F_{mn} \frac{\sin(2k+1)\varphi_1}{\rho_1^{2k+1}}.
\end{aligned}$$

Обозначим решение системы (19), (20) через  $\alpha_{2k}^*$ .

Равенства

$$\alpha_{2k+2} = \alpha_{2k+2}^* \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (21)$$

определяют усилия взаимодействия между панелью и включением.

Запишем системы, определяющие коэффициенты  $\alpha_{2k}$  и  $\alpha_{2k}^*$  в следующем виде:

$$\alpha_{2j+2} = \sum_{k=0}^{\infty} A_{j,k} \alpha_{2k+2} + b_j, \quad (22)$$

$$\alpha_{2j+2}^* = \sum_{k=0}^{\infty} A_{j,k}^* \alpha_{2k+2} + b_j^*. \quad (23)$$

Умножая систему (23) на  $-\chi \mu_b / \chi_{b\mu}$  и складывая с (22), с учетом равенств (21) получим

$$\alpha_{2j+2} \left( 1 - \frac{\chi \mu_b}{\chi_b \mu} \right) = \sum_{k=0}^{\infty} \left[ A_{j,k} - \frac{\chi \mu_b}{\chi_b \mu} A_{j,k}^* \right] \alpha_{2k+2} + b_j - \frac{\chi \mu_b}{\chi_b \mu} b_j^*. \quad (24)$$

Чтобы исключить из (24) коэффициенты  $\alpha_{2k+2}$ , воспользуемся следующим приемом. Краевое условие (16) приведем к виду (11):

$$\Phi_1(\tau) + \overline{\Phi_1(\tau)} - [\bar{\tau} \Phi_1'(\tau) + \Psi_1(\tau)] e^{2i\theta} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_{2k}^* e^{2ik\theta} + (1 + \chi) \overline{\Phi_1(\tau)}. \quad (25)$$

Подставив теперь вместо левой части в (25) ее выражения из (11), а вместо функции  $\overline{\Phi_1(\tau)}$  в правой части ее ряд Фурье и приравняв затем коэффициенты при одинаковых степенях  $e^{i\theta}$  в левой и правой частях соотношения (25), находим:

$$A_{2j+2} = \frac{1 + \chi}{1 - \mu/\mu_b} \alpha_{2k+2}, \quad (26)$$

$$A_{-2j} = \frac{1 + \chi}{1 + \chi_b \mu/\mu_b} \sum_{k=0}^{\infty} r_{j,k} \lambda^{2j+2k+2} \alpha_{2k+2} + \frac{1}{1 + \chi_b \mu/\mu_b} (M'_{-2j} - M_{-2j}), \quad (27)$$

$$A_0 = \left[ 1 - \frac{\mu(1 - \chi_b)}{2\mu_b} \right] = M'_0 - M_0 + (1 + \chi) \alpha_0 + (1 + \chi) \sum_{k=0}^{\infty} r_{0,k} \lambda^{2k+2} \alpha_{2k+2}. \quad (28)$$

Формулы (26) позволяют исключить из (24) коэффициенты  $\alpha_{2k+2}$ . В результате получим бесконечную систему линейных алгебраических уравнений относительно  $A_{2k}$ :

$$A_{2j+2} = \sum_{k=0}^{\infty} d_{j,k} A_{2k+1} + T_j \quad (j = 0, 1, \dots), \quad (29)$$

$$d_{j,k} = (2j+1) \lambda^{2j+2k+2} S_{j,k} / \gamma, \quad (30)$$

$$S_{j,k} = \frac{1 - \mu/\mu_b}{1 + \chi} \left( \gamma_{j,k} + \frac{\mu_b}{\chi_b \mu} \gamma_{j,k}^* + D_{j,k} \right),$$

$$D_{j,k} = \lambda^2 \frac{g_{j+1} g_{k+1}}{\lambda^{2j+2k+4}} r(\mu/\mu_b),$$

$$\eta(\mu/\mu_b) = \frac{(\chi_b - 1)}{\chi_b} \frac{1}{1 + (\chi - 1) k_2 \lambda^2} - \frac{2}{1 - 2k_2 \lambda^2},$$

$$1 - (1 - 2k_2 \lambda^2) \left[ \frac{\chi - 1}{\chi + 1} - \frac{\mu}{\mu_b} \frac{\chi_b - 1}{\chi + 1} \right],$$

$$T_0^* = \left( 1 + \frac{\mu_b}{\chi_b \mu} \right) \frac{\sigma_0}{2}, \quad T_j = (T_j^* + k_j) / \gamma,$$

$$k_0 = M_2 + \frac{\mu_b}{\chi_b \mu} M'_2 - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{g_{k+2} \lambda^{2k+4}}{2^{2k+4}} \left( M_{-2k-2} + \frac{\mu_b}{\omega \chi_b \mu} M'_{-2k-2} \right),$$

$$\begin{aligned}
T_j^* &= \frac{\sigma_0}{4} \frac{(2j+1)g_{j+1}\lambda^{2j+2}}{2^{2j+2}} \eta(\mu/\mu_b), \\
\eta_1(\mu/\mu_b) &= \frac{(1+\mu_b/\chi_b\mu) \left[ \frac{\mu}{\mu_b}(\chi_b-1) - (\chi-1) \right]}{1 + (\chi-1)k_2\lambda^2 + \frac{\mu}{2\mu_b}(\chi_b-1)(1-2k_2\lambda^2)}, \\
k_j &= \frac{(2j+1)g_{j+1}\lambda^{2j+2}}{2^{2j+2}} \left\{ \frac{1 + (\chi-1)k_2\lambda^2}{e} \left[ \frac{1}{(1-2k_2\lambda^2)} + \frac{1-\chi_b}{2\chi_b[1 + (\chi-1)k_2\lambda^2]} \right] - 1 \right\} M_0 - \\
&\quad - \frac{(2j+1)g_{j+1}\lambda^{2j+2}}{2^{2j+2}} \left\{ \frac{1}{(1-2k_2\lambda^2)e} + \frac{1}{\chi_b[1 + (\chi-1)k_2\lambda^2]} \left( \frac{1-\chi_b}{2e} + \frac{\mu}{\mu_b} \right) \right\} M'_0 + \\
&\quad + M_{2j+2} + \frac{\mu_b}{\chi_b\mu} M'_{2j+2} - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(2j+2k+3)!g_{j+k+2}\lambda^{2j+2k+4}}{(2j)!(2k+3)!2^{2j+2k+4}} \left( M_{-2k-2} + \frac{\mu_b}{\chi_b\mu} M'_{-2k-2} \right), \\
\gamma &= \frac{(1-\mu/\mu_b)(1-\chi\mu_b/\chi_b\mu)}{(1+\chi)} - \frac{1+\chi_b}{\chi_b}, \\
e &= 1 - \frac{\mu(1-\chi_b)}{2\mu_b}.
\end{aligned}$$

Напомним, что в полученные алгебраические системы через коэффициенты  $M_{2k}$ ,  $M'_{2k}$  входят неизвестные сосредоточенные силы  $F_{mn}$  ( $m = 1, 2, \dots$ ;  $n = 1, 2, \dots$ ).

### Определение величин сосредоточенных сил

Займемся определением сосредоточенных сил. Для определения величины  $F_{mn}$  используем закон Гука. Согласно этому закону, искомая величина сосредоточенной силы  $F_{mn}$ , действующей на каждую заклепку со стороны ребра жесткости, равна

$$F_{mn} = \frac{E_s \cdot A}{2y_0 n} \Delta v_{mn} \quad (m = 1, 2, \dots; n = 1, 2, \dots), \quad (31)$$

где  $\Delta v_{mn}$  – взаимное смещение заклепок, равное удлинению соответствующего участка ребра.

Для определения  $\Delta v_{mn}$  необходимо найти взаимное смещение точек  $z = mL + i(ny_0 - a_0)$  и  $z = mL - i(ny_0 - a_0)$  в рассматриваемой задаче.

Используя полученные соотношения после выполнения элементарных, хотя и несколько громоздких выкладок, взаимное смещение заклепок  $\Delta v_{mn}$  указанных точек найдем в виде

$$\Delta v_{pr} = \Delta v_{p,r}^{(0)} + \Delta v_{p,r}^{(1)}, \quad (32)$$

$$\Delta v_{p,r}^{(0)} = \frac{1}{2\pi(1+\chi)\mu h} \sum_{m,n} F_{mn} \left[ \chi \ln \frac{(p_0-m)^2 L^2 + a_0^2}{(p_0-m)^2 L^2 + [(r-n)y_0 - a_0]^2} + \right. \\ \left. + \frac{2(r-n)y_0 [(r-n)y_0 - a_0] \langle 2p_0(p_0-m)L^2 + a_0 [(r-n)y_0 - a_0] \rangle}{\langle (p_0-m)^2 L^2 + [(r-n)y_0 - a_0]^2 \rangle [(p_0-m)^2 L^2 + a_0^2]} + \right. \\ \left. + \frac{\sigma_0}{2\mu} (1+\chi)(ry_0 - a_0) \right], \quad (33)$$

$$\Delta v_{p,r}^{(1)} = \frac{1}{\mu} \left[ (\chi-1)(ry_0 - a_0)\alpha_0 + (\chi+1) \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{2k+2} \frac{\lambda^{2k+2} \sin(2k+1)\alpha}{(2k+1)\rho_2^{2k+1}} + \right. \\ \left. + (\chi-1) \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{2k+2} \lambda^{2k+2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{r_{j,k}}{2j+1} \rho_2^{2j+1} \sin(2j+1)\alpha - \right. \\ \left. - \sum_{k=0}^{\infty} \beta_{2k+2} \frac{\lambda^{2k+2} \sin(2k+1)\alpha}{(2k+1)\rho_2^{2k+1}} - \sum_{k=0}^{\infty} \beta_{2k+2} \lambda^{2k+2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{r_{j,k}}{2j+1} \rho_2^{2j+1} \sin(2j+1)\alpha + \right. \\ \left. + \sum_{k=0}^{\infty} (2k+2) \alpha_{2k+2} \lambda^{2k+2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(2j+2k+2)}{2j+1} r_{j,k} \rho_2^{2j+1} \sin(2j+1)\alpha \right]. \quad (34)$$

Бесконечная алгебраическая система (31) с учетом (32), (34) принимает следующий вид:

$$F_{pr} = \frac{E_s A}{4\pi(1+\chi)\mu h r y_0} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} F_{mn} \left[ \chi \ln \frac{(p-m)^2 L^2 + a_0^2}{(p-m)^2 L^2 + [(r-n)y_0 - a_0]^2} + \right. \\ \left. + \chi \ln \frac{(p+m)^2 L^2 + a_0^2}{(p+m)^2 L^2 + [(r-n)y_0 - a_0]^2} + \right. \\ \left. + \frac{2(r-n)y_0 [(r-n)y_0 - a_0] \langle 2p(p-m)L^2 + a_0 [(r-n)y_0 - a_0] \rangle}{\langle (p-m)^2 L^2 + [(r-n)y_0 - a_0]^2 \rangle [(p-m)^2 L^2 + a_0^2]} + \right. \\ \left. + \frac{2(r-n)y_0 [(r-n)y_0 - a_0] \langle 2p(p+m)L^2 + a_0 [(r-n)y_0 - a_0] \rangle}{\langle (p+m)^2 L^2 + [(r-n)y_0 - a_0]^2 \rangle [(p+m)^2 L^2 + a_0^2]} + \right. \\ \left. + \frac{2(r+n)y_0 [(r+n)y_0 - a_0] \langle 2p(p-m)L^2 + a_0 [(r+n)y_0 - a_0] \rangle}{\langle (p-m)^2 L^2 + [(r+n)y_0 - a_0]^2 \rangle [(p-m)^2 L^2 + a_0^2]} + \right. \\ \left. + \frac{2(r+n)y_0 [(r+n)y_0 - a_0] \langle 2p(p+m)L^2 + a_0 [(r+n)y_0 - a_0] \rangle}{\langle (p+m)^2 L^2 + [(r+n)y_0 - a_0]^2 \rangle [(p+m)^2 L^2 + a_0^2]} + \right.$$



$$\begin{aligned}
& + \frac{E_s A \sigma_0 (\chi + 1)}{2 y_0 r 4 \mu} \left[ \alpha_0 (r y_0 - a_0) (\chi - 1) + (\chi + 1) \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{2k+2} \frac{\lambda^{2k+2} \sin(2k+1)\alpha}{(2k+1) \rho_2^{2k+1}} + \right. \\
& \quad + (\chi - 1) \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{2k+2} \lambda^{2k+2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{r_{j,k}}{2j+1} \rho_2^{2j+1} \sin(2j+1)\alpha - \\
& \quad - \sum_{k=0}^{\infty} \beta_{2k+2} \frac{\lambda^{2k+2} \sin(2k+1)\alpha}{(2k+1) \rho_2^{2k+1}} - \sum_{k=0}^{\infty} \beta_{2k+2} \lambda^{2k+2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{r_{j,k}}{2j+1} \rho_2^{2j+1} \sin(2j+1)\alpha + \\
& \quad \left. + \sum_{k=0}^{\infty} (2k+2) \alpha_{2k+2} \lambda^{2k+2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(2j+2k+2)}{2j+1} r_{j,k} \rho_2^{2j+1} \sin(2j+1)\alpha \right]. \quad (35)
\end{aligned}$$

Таким образом, получены основные разрешающие уравнения задачи, позволяющие определить искомые коэффициенты  $\alpha_{2k}$ ,  $\beta_{2k}$ ,  $A_{2k}$  и величины сосредоточенных сил  $F_{mn}$ . Зная их, можно определить напряженно-деформированное состояние панели. Бесконечные алгебраические системы уравнений (13), (15), (19), (28) и система уравнений (35) оказались связанными между собой и должны решаться совместно.

Отметим предельные случаи:

- а) материал включения и панели одинаков, т. е.  $\mu = \mu_b$ ,  $\chi = \chi_b$ . Из поставленного решения следует  $\Phi_1(z) = 0$ ,  $\Psi_1(z) = 0$ ;
- б) абсолютно жесткие включения, т. е.  $\mu/\mu_b = 0$ . После некоторых преобразований можно показать, что система (29) совпадает с (19);
- в) панель со свободными от усилия краями. В этом случае  $\mu_b/\mu = 0$  и система (16) совпадает с (13).

### Численные результаты и их анализ

Для определения искомых величин необходимо совместно решать линейные системы (29), (26), (28), (15), (35). Результирующая система будет замкнутой относительно входящих в нее неизвестных  $\alpha_{2k}$ ,  $\beta_{2k}$ ,  $A_{2k}$ ,  $F_{mn}$ .

Полученные системы решались численно. При этом бесконечные системы (26), (29) урезались до большого числа уравнений в зависимости от расстояния между отверстиями. Урезанные системы решались методом Гаусса с выбором главного элемента для разных значений порядка  $N$  в зависимости от радиуса отверстий.

После нахождения значений  $\alpha_{2k}$ ,  $\beta_{2k}$ ,  $A_{2k}$ ,  $F_{mn}$  на основании приведенных выше формул и соотношений Колосова – Мусхелишвили [9] определялось напряженное состояние панели.

Были рассмотрены наряду с упругим включением и предельные случаи: абсолютно жесткое включение, отверстия ничем не заполнены. Для любого упругого включения картина напряженного состояния будет занимать промежуточное положение между этими двумя предельными случаями.

### Выводы

Предложена эффективная методика решения задачи теории упругости для перфорированных панелей, подкрепленных большим числом поперечных

ребер жесткости, когда круговые отверстия панели заполнены шайбами из другого упругого материала. Исследовано влияние взаимного расположения включений, ребер жесткости и точек крепления на напряженно-деформированное состояние составной панели.

Степень снижения концентрации напряжений на контуре отверстий тем больше, чем выше жесткость включения и подкрепляющего элемента, а также чем ближе расположение точек крепления между собой. Наличие гибкого включения повышает концентрацию напряжений, тогда как жесткие включения уменьшают его.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Партон В.З., Морозов Е.М.* Механика упругопластического разрушения. Москва : Наука, 1985. 504 с.
2. *Kravets V.S.* Effect of breaks in riveted stringers on the elastic and limiting equilibrium of a cracked plate // *Materials Science*. 1999. V. 35. I. 3. P. 339–348.
3. *Mir-Salim-zadeh M.V.* Fracture of an isotropic medium strengthened with a regular system of stringers // *Mechanics of Composite Materials*. 2007. V. 43. I. 1. P. 41–50.
4. *Мир-Салим-заде М.В.* Рост когезионной трещины в стрингерной пластине // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2013. № 4. С. 16–22.
5. *Мир-Салим-заде М.В.* Периодическая контактная задача для стрингерной пластины // *Тяжелое машиностроение*. 2015. № 6. С. 35–39.
6. *Mir-Salim-zadeh M.V.* Contact problem for a stringer plate weakened by a periodic system of variable width slots // *Structural Engineering and Mechanics*. 2017. V. 62. № 6. P. 719–724.
7. *Bedair O.* Analysis and limit state design of stiffened plated and shells: A world view // *Applied Mechanics Reviews*. ASME. 2009. V. 62. 12. 020501 (16 p.).
8. *Дударьков Ю.И., Лимонин М.В., Левченко Е.А.* Некоторые особенности оценки несущей способности стрингерных панелей из ПКМ // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2019. Т. 25/ № 2. С. 192–206.
9. *Мухелишвили Н.И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. Москва : Наука, 1966. 707 с.

#### REFERENCES

1. *Parton V.Z., Morozov E.M.* Mekhanika uprugoplasticheskogo razrusheniya [Elastoplastic fracture mechanics]. Moscow: Nauka, 1985. 504 p. (rus)
2. *Kravets V.S.* Effect of breaks in riveted stringers on the elastic and limiting equilibrium of a cracked plate. *Materials Science*. 1999. V. 35. Pp. 339–348.
3. *Mir-Salim-zade M.V.* Fracture of an isotropic medium strengthened with a regular system of stringers. *Mechanics of Composite Materials*. 2007. V. 43. Pp. 41–50.
4. *Mir-Salim-zade M.V.* Rost kogeziionnoi treshchiny v stringernoi plastine [Cohesive crack growth in a stringer plate]. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2013. No. 4. Pp. 16–22. (rus)
5. *Mir-Salim-zade M.V.* Periodicheskaya kontaktnaya zadacha dlya stringernoi plastiny [Periodic contact problem for stringer plate]. *Tyazheloe mashinostroenie*. 2015. No. 6. Pp. 35–39. (rus)
6. *Mir-Salim-zade M.V.* Contact problem for a stringer plate weakened by a periodic system of variable width slots. *Structural Engineering and Mechanics*. 2017. V. 62. Pp. 719–724.
7. *Bedair O.* Analysis and limit state design of stiffened plated and shells: A world view. *Applied Mechanics Reviews*. ASME. 2009. V. 62. 12. P. 020501.
8. *Dudarkov Yu.I.1, Limonin M.V.1, Levchenko E.A.* Nekotorye osobennosti otsenki nesushchei sposobnosti stringernykh panelei iz PKM [Bearing capacity of carbon fiber reinforced polymer stringer plates]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktii*. 2019. V. 25. No. 2. Pp. 192–206. (rus)

9. *Muskhelishvili N.I.* Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoi teorii uprugosti [Basic problems of mathematical theory of elasticity]. Moscow: Nauka, 1966. 707 p. (rus)

**Сведения об авторе**

*Яхьяев Джошгун Дунямин оглу*, аспирант, Азербайджанский технический университет, AZ1073, г. Баку, пр. Г. Джавида, 25, [neftoil.az@rambler.ru](mailto:neftoil.az@rambler.ru)

**Author Details**

*Joshgun D. Yakhyayev*, Research Assistant, Azerbaijan Technical University, 25, H. Javid Ave., Baku, Azerbaijan, [neftoil.az@rambler.ru](mailto:neftoil.az@rambler.ru)

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 666.9-127

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-140-146

*В.А. ВЛАСОВ, В.В. ШЕХОВЦОВ, О.Г. ВОЛОКИТИН,  
Н.К. СКРИПНИКОВА, Г.Г. ВОЛОКИТИН, Р.Е. ГАФАРОВ,  
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТАВА МИКРОСФЕР НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ АЛЮМОСИЛИКАТНОЙ ГРУППЫ\*

В большинстве случаев оболочка микросфер алюмосиликатной группы представлена рентгеноаморфным состоянием, что существенно снижает прочностную характеристику. Однако есть ряд технологических особенностей, применяемых в промышленности, где осуществляется образование стеклокристаллического и кристаллического состояния конденсированной фазы, представленной оболочкой микросферы. Наиболее интересным на сегодняшний день является процесс формирования структурно-фазового состава при взаимодействии материалов алюмосиликатной группы (отношение  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  варьируется в широком диапазоне 0–100 %) с высокотемпературным газовым потоком (плазма – температура  $\geq 5000$  К). В статье представлены результаты исследований, показывающие изменение структурно-фазового состояния конденсированной фазы на основе материалов алюмосиликатной группы при производстве микросфер. По результатам качественного рентгенофазового анализа определено, что процесс формирования структурно-фазового состава оболочки микросфер на основе тугоплавких поликристаллических материалов обеспечивает: образование рентгеноаморфной структуры оболочки после охлаждения при концентрации  $\text{SiO}_2 \geq 60$  масс. % в исходном порошке; переход скрытокристаллической модификации  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  в высокотемпературную  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  при алюмооксидном исходном порошке.

**Ключевые слова:** микросферы; плазма; рентгенодифракционные спектры; зола; кварцевый песок; бемит.

**Для цитирования:** Власов В.А., Шеховцов В.В., Волокитин О.Г., Скрипникова Н.К., Волокитин Г.Г., Гафаров Р.Е. Особенности формирования структурно-фазового состава микросфер на основе материалов алюмосиликатной группы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 4. С. 140–146.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-140-146

---

\* Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект № 20-79-10102).

V.A. VLASOV, V.V. SHEKHOVTSOV, O.G. VOLOKITIN,  
N.K. SKRIPNIKOVA, G.G. VOLOKITIN, R.E. GAFAROV,  
*Tomsk State University of Architecture and Building*

## STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF ALUMINOSILICATE-BASED MICROSPHERES

The paper focuses on aluminosilicate-based microspheres, whose shell represents an X-ray amorphous state, which significantly reduces their strength properties. However, a number of technological characteristics used in industry provide the formation of glass-ceramic and crystalline states of the condensed phase, which is the shell microsphere. Presently, the formation of the structure and phase composition during the interaction between aluminosilicates (the  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio varies between 0–100 %) and high-temperature ( $\geq 5000$  K) plasma is most interesting. This paper presents the research results of the structure and phase composition of the aluminosilicate-based condensed phase during the microsphere production. The X-ray phase analysis shows that after cooling, the structure and phase composition of the microsphere shells based on refractory polycrystalline materials promotes the formation of the X-ray amorphous structure at  $\text{SiO}_2 \geq 60$  wt. % in the initial powder and the transition of  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  cryptocrystalline phase to high-temperature  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  phase with the use of the initial alumina powder.

**Keywords:** microspheres; plasma; X-ray diffraction pattern; ash; silica sand; boehmite.

**For citation:** Vlasov V.A., Shekhovtsov V.V., Volokitin O.G., Skripnikova N.K., Volokitin G.G., Gafarov R.E. Osobennosti formirovaniya strukturno-fazovogo sostava mikrosfer na osnove materialov alyumosilikatnoi gruppy [Structure and phase composition of aluminosilicate-based microspheres]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 4. Pp. 140–146.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-140-146

Сегодня микросферы широко применяются при производстве теплоизоляционных материалов, радиопрозрачных керамик и специальных видов цемента, а также разрабатываются новые технологии их применения в различных областях промышленности [1–5]. Но с каждым годом вместе с технологическим прогрессом растут и требования, предъявляемые к качеству микросфер [6–9]. На рис. 1 представлена схема перспективных направлений применения полых микросфер различного состава.

Полая микросфера является одним из популярных инженерных материалов и находит применение в различных отраслях промышленности [10, 12]. При изготовлении структурированных материалов и покрытий на основе полых микросфер возможно достичь снижения плотности материала, изменения коэффициента теплового расширения и т. д. [13, 14].

Добиться высоких технических характеристик позволяет плазменный метод производства микросфер, при котором сырьевые материалы обрабатываются в высокотемпературном потоке плазмы. Однако особенности формирования структурно-фазового состава микросфер при высокотемпературном нагреве мало изучены. Данная работа является продолжением серии исследований [15–17] поведения агломерированных тугоплавких оксидов в высокотемпературном потоке газа (плазма) при получении микросфер алюмосиликатной группы.

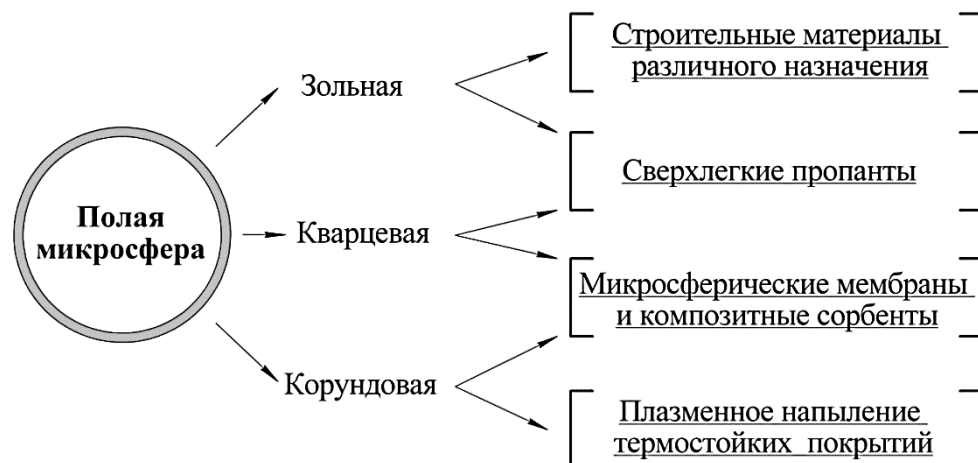


Рис. 1. Перспективные направления применения полых микросфер на основе оксидных материалов

Для исследования фазовых переходов проведен качественный рентгенофазовый анализ оболочки микросфер, полученных в потоке плазмы, на основе исследуемых материалов. На рис. 2 представлены рентгенодифракционные спектры зольного остатка ГРЭС и полученных микросфер на его основе.

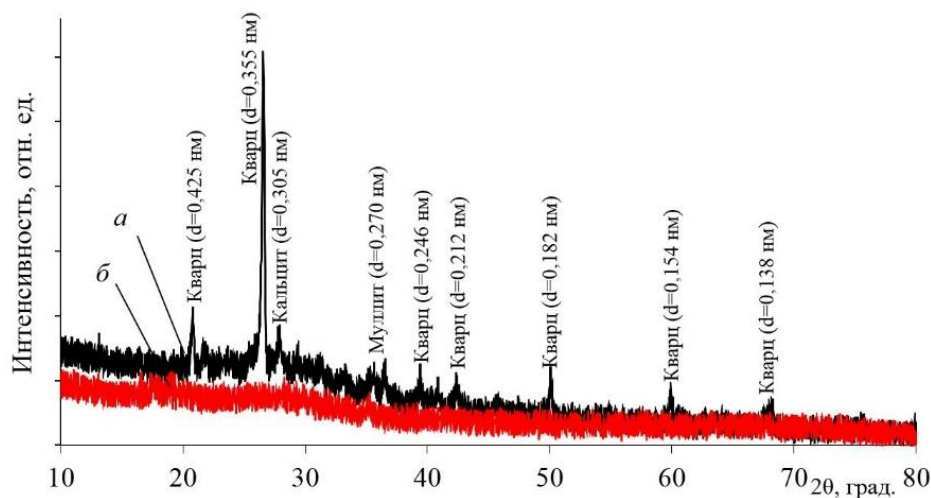


Рис. 2. Рентгенодифракционные спектры:  
а – зольный остаток ГРЭС; б – полученные микросферы на его основе

У зольного остатка, представленного многокомпонентной оксидной системой, идентифицированы пики, характерные для фаз муллита  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  ( $d = 0,270$  нм) и кальцита  $\text{CaCO}_3$  ( $d = 0,305, 0,212$  нм) наряду с большим количеством стеклофазы. При анализе рентгенодифракционного спектра полученных микросфер (рис. 2, б) можно судить о полном плавлении введенных аг-

ломерированных частиц в поток плазмы, а также отсутствию формирования молекулярной решетки на стадии охлаждения частицы. Формирование рентгеноаморфной структуры оболочки микросферы на основе зольного остатка ГРЭС обусловлено резким охлаждением сформированных полых капель расплава в зоне сбора микросфер, заполненной водой.

На рис. 3 представлены рентгенодифракционные спектры кварцевого песка и полученных микросфер на его основе. На рис. 3, *а* видны ярко выраженные дифракционные максимумы, соответствующие кварцу  $\text{SiO}_2$  ( $d = 0,425$ ;  $0,352$ ;  $0,335$ ;  $0,223$ ;  $0,154$ ;  $0,145$ ;  $0,120$ ;  $0,118$  нм).

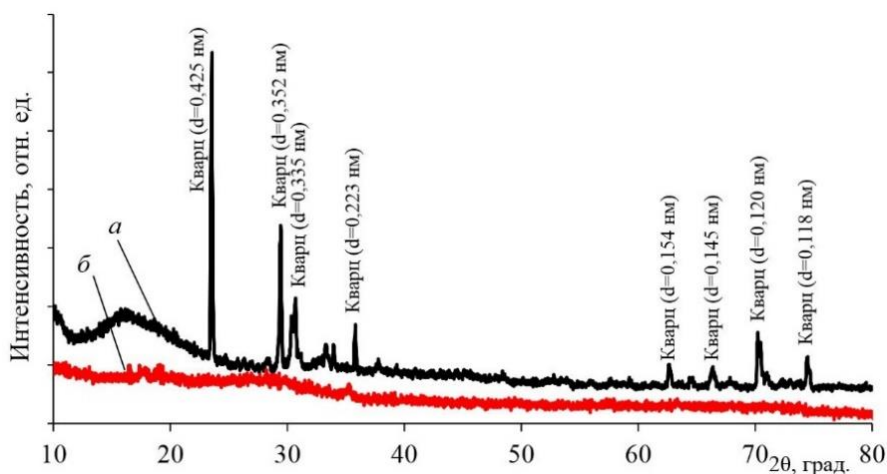


Рис. 3. Рентгенодифракционные спектры:  
*а* – кварцевый песок; *б* – полученные микросферы на его основе

Как и в случае обработки порошка на основе зольного остатка, наблюдается полное плавление введенных частиц кварцевого песка. На рентгенодифракционных спектрах отсутствуют пики кристаллической фазы. На основе результатов качественного рентгенофазового анализа зольного остатка ГРЭС и кварцевого песка установлена связь между исходными порошками и полученными микросферами на их основе. Полученные микросферы характеризуются рентгеноаморфным состоянием, следовательно, можно считать, что на основе материалов с высоким содержанием  $\text{SiO}_2 \geq 50$  масс. % возможно получать стеклянные полые микросферы в потоке плазмы.

Исходный фазовый состав бемита (рис. 4, *а*) представлен скрытокристаллической модификацией  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , что подтверждается характерными дифракционными максимумами ( $d = 0,241$ ;  $0,205$ ;  $0,199$ ;  $0,161$ ;  $0,139$  нм).

На рис. 4, *б* показан рентгенодифракционный спектр оболочки микросферы на основе порошка бемита. Вследствие термической обработки порошка бемита осуществляется переход  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  в высокотемпературную стабильную модификацию  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Фазовый переход подтверждается дифракционными максимумами ( $d = 0,382$ ;  $0,343$ ;  $0,254$ ;  $0,237$ ;  $0,208$ ;  $0,176$ ;  $0,159$ ;  $0,154$ ;  $0,151$ ;  $0,140$ ;  $0,114$ ;  $0,112$  нм).

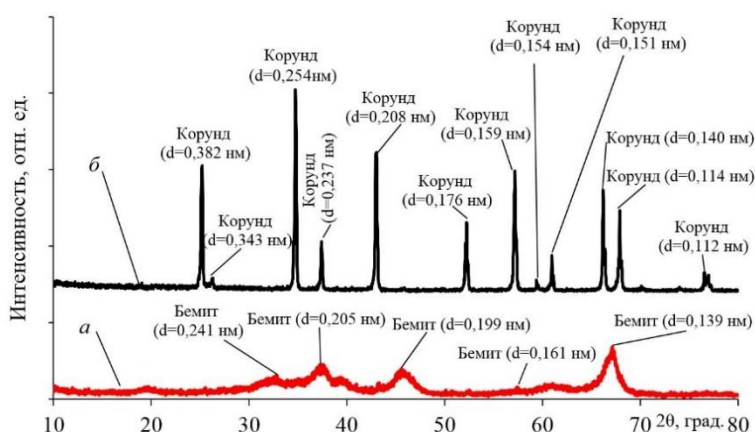


Рис. 4. Рентгенодифракционные спектры:  
а – берил; б – полученные микросферы на его основе

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что процесс формирования структурно-фазового состава оболочки микросфер на основе тугоплавких поликристаллических материалов обеспечивает: образование рентгеноаморфной структуры оболочки после охлаждения при концентрации  $\text{SiO}_2 \geq 60$  масс. % в исходном порошке; переход скрытокристаллической модификации  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  в высокотемпературную  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  при алюмооксидном исходном порошке.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hanifa Asad, Lu Zeyu, Li Zongjin. Utilization of fly ash cenosphere as lightweight filler in cement-based composites A review // Construction and Building Materials. 2017. V. 144. № 30. P. 373–384.
2. Перфилов В.А., Котляревская А.В., Канавец У.В. Влияние полых стеклянных микросфер на свойства легких мелкозернистых бетонов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. № 43 (62). С. 93–103.
3. Navid R., Carsten K. Cenospheres: A review // Fuel. 2017. V. 207. № 1. P. 1–12.
4. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Деформации высокопрочных легких бетонов на полых микросферах и способ их снижения // Строительные материалы. 2015. № 5. С. 23–30.
5. Kornienko E.E., Lapushkina E.J., Kuzmin V.I. Air plasma sprayed coatings of self-fluxing powder materials // Journal of Physics: Conference Series. 2014. V. 567. № 1. P. 012010.
6. Yi Li, Xiangpeng Gao, Hongwei Wu Further Investigation into the Formation Mechanism of Ash Cenospheres from an Australian Coal-Fired Power Station // Energy Fuels. 2013. V. 27. № 2. P. 811–815.
7. Shelby J.E. Introduction to glass science and technology // Cambridge: The Royal Society of Chemistry. 2005. 312 p.
8. Vassilev S.V., Menendez R., Diaz-Somoano M., Martinez-Tarazona M.R. Phase-mineral and chemical composition of coal fly ashes as a basis for their multicomponent utilization. 2. Characterization of ceramic cenosphere and salt concentrates // Fuel. 2004. V. 83. P. 585–603.
9. Донской А.В., Клубник В.С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. Ленинград : Машиностроение, 1979. 221 с.
10. Li G.W. Li L.T.W., Tian Z. C. et al. General and facile method to prepare uniform gamma-alumina hollow microspheres from waste oil shale ash // Materials Letters. 2014. V. 133. P. 143–146.



11. Vakalova T.V., Khabas T.A., Revva I.B., Pavlova I.A. Heat-Insulating Ceramics which Have a Nanoporous Structure and are Made with the Use of Ash-Bearing Wastes from Power Plants // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2015. V. 55. № 6. P. 505–510.
12. Maciej Z., Rui C.N., Luis F.S., Karol W. Characterization of fly-ash cenospheres from coal-fired power plant unit // *Fuel*. 2016. V. 174. P. 49–53.
13. Kim G.H., Sohn I. Effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  on the viscosity and structure of calcium silicate-based melts containing  $\text{Na}_2\text{O}$  and  $\text{CaF}_2$  // *J. Non-Crystalline Solids*. 2012. V. 358. P. 1530–1537.
14. Kwan A.K.H., Chen J.J. Adding fly ash microsphere to improve packing density, flowability and strength of cement paste // *Powder Technology*. 2013. V. 234. P. 19–25.
15. Шеховцов В.В., Волокитин О.Г. Технология получения микросфер различной структуры на основе золошлаковых отходов плазменным методом // *Техника и технология силикатов*. 2017. Т. 24. № 3. С. 2–6.
16. Волокитин Г.Г., Шеховцов В.В., Скрипникова Н.К., Волокитин О.Г., Волланд С. Физико-химические процессы получения зольных микросфер с использованием низкотемпературной плазмы // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016. № 3 (56). С. 139–145.
17. Шеховцов В.В., Волокитин О.Г., Гафаров Р.Е., Семеновых М.А. Получение микросфер на основе материалов алюмосиликатной группы // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2019. Т. 21. № 6. С. 134–139.

#### REFERENCES

1. Hanifa Asad, Lu Zeyu, Li Zongjin. Utilization of fly ash cenosphere as lightweight filler in cement-based composites A review. *Construction and Building Materials*. 2017. V. 144. No. 30. Pp. 373–384.
2. Perfilov V.A., Kotlyarevskaya A.V., Kanavets U.V. Vliyanie polykh steklyannykh mikrosfer na svoystva legkikh melkozernistykh betonov [Influence of hollow glass microspheres on light fine-grained concrete properties]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2016. No. 43 (62). Pp. 93–103. (rus)
3. Navid R., Carsten K. Cenospheres: A review. *Fuel*. 2017 V. 207. No. 1. Pp. 1–12.
4. Inozemtsev A.S., Korolev E.V. Deformatsii vysokoprochnykh legkikh betonov na polykh mikrosferakh i sposob ikh snizheniya [Deformation of high-strength lightweight concretes on hollow microspheres and method of deformation reduction]. *Stroitel'nye materialy*. 2015. No. 5. Pp. 23–30. (rus)
5. Kornienko E.E., Lapushkina E.J., Kuzmin V.I. Air plasma sprayed coatings of self-fluxing powder materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. V. 567. No. 1. P. 012010.
6. Yi Li, Xiangpeng Gao, Hongwei Wu. Further investigation into the formation mechanism of ash cenospheres from an Australian Coal-Fired Power Station. *Energy Fuels*. 2013. V. 27. No. 2. Pp. 811–815.
7. Shelby J.E. Introduction to glass science and technology. Cambridge: The Royal Society of Chemistry. 2005. 312 p.
8. Vassilev S.V., Menendez R., Diaz-Somoano M., Martinez-Tarazona M.R. Phase-mineral and chemical composition of coal fly ashes as a basis for their multicomponent utilization. 2. Characterization of ceramic cenosphere and salt concentrates. *Fuel*. 2004. V. 83. Pp. 585–603.
9. Donskoi A.V., Klubnikin V.S. Elektroplazmennye protsessy i ustanovki v mashinostroenii [Plasma processes and plants in mechanical engineering]. Leningrad: Mashinostroenie, 1979. 221 p. (rus)
10. Li G.W., Li L.T.W., Tian Z. C., et al. General and facile method to prepare uniform gamma-alumina hollow microspheres from waste oil shale ash. *Materials Letters*. 2014. V. 133. Pp. 143–146.
11. Vakalova T.V., Khabas T.A., Revva I.B., Pavlova I.A. Heat-insulating ceramics which have a nanoporous structure and are made with the use of ash-bearing wastes from power plants. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2015. V. 55. No. 6. Pp. 505–510.
12. Maciej Z., Rui C.N., Luis F.S., Karol W. Characterization of fly-ash cenospheres from coal-fired power plant unit. *Fuel*. 2016. V. 174. Pp. 49–53.

13. Kim G.H., Sohn I. Effect of  $Al_2O_3$  on the viscosity and structure of calcium silicate-based melts containing  $Na_2O$  and  $CaF_2$ . *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2012. V. 358. Pp. 1530–1537.
14. Kwan A.K.H., Chen J.J. Adding fly ash microsphere to improve packing density, flowability and strength of cement paste. *Powder Technology*. 2013. V. 234. Pp. 19–25.
15. Shekhovtsov V.V., Volokitin O.G. Tekhnologiya polucheniya mikrosfer razlichnoy struktury na osnove zoloshlakovykh otkhodov plazmennym metodom [Ash and slag-based microsphere plasma technology]. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*. 2017. V. 24. No. 3. Pp. 2–6. (rus)
16. Volokitin G.G., Shekhovtsov V.V., Skripnikova N.K., Volokitin O.G., Wolland S. Fiziko-khimicheskiye protsessy polucheniya zol'nykh mikrosfer s ispol'zovaniyem nizkotemperaturnoy plazmy [Physicochemical processes of spherical particle production using low-temperature plasma]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 3 (56). Pp. 139–145. (rus)
17. Shekhovtsov V.V., Volokitin O.G., Gafarov R.E., Semenovskiy M.A. Poluchenie mikrosfer na osnove materialov alyumosilikatnoi gruppy [Aluminosilicate microsphere production]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2019. V. 21. No. 6. Pp. 134–139. (rus)

#### Сведения об авторах

Власов Виктор Алексеевич, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, rector@tsuab.ru

Шеховцов Валентин Валерьевич, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, shehovcov2010@yandex.ru

Волокитин Олег Геннадьевич, докт. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, volokitin\_oleg@mail.ru

Скрипникова Нелли Карповна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, nks2003@mail.ru

Волокитин Геннадий Георгиевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, vggtomsk@mail.ru

Гафаров Руслан Евгеньевич, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, GreexRayne@gmail.com

#### Authors Details

Viktor A. Vlasov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, rector@tsuab.ru

Valentin V. Shekhovtsov, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, shehovcov2010@yandex.ru

Oleg G. Volokitin, DSc, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, volokitin\_oleg@mail.ru

Nelli K. Skripnikova, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, nks2003@mail.ru

Gennady G. Volokitin, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, vgg-tomsk@mail.ru

Ruslan E. Gafarov, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, GreexRayne@gmail.com

УДК 691.542

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-147-156

*О.В. ДЕМЬЯНЕНКО, Н.О. КОПАНИЦА,**Ю.С. САРКИСОВ, Н.П. ГОРЛЕНКО,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ С КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКОЙ

В работе приводятся результаты физико-химических исследований продуктов твердения в системе «цемент-комплексная добавка – вода». Выбор модифицирующей добавки основан на структурно-химическом сродстве фрагментов добавки с цементом, в состав которой вошли высокодисперсный микрокремнезем таркосил марки Ts-38 и торфяная добавка МТ-600. Синергетический эффект действия комплексной добавки привел к значительному улучшению эксплуатационных характеристик цементного камня: прочности, морозостойкости, водостойкости и др. Комплекс физико-химических исследований показал, что механизм действия добавки сводится к повышению плотности структуры цементного камня за счет образования низкоосновных гидросиликатов и их разновидностей типа афвиллита, фошагита и трускоттита.

**Ключевые слова:** цементный камень; комплексная добавка; прочность; эксплуатационные характеристики; синергетический эффект; рентгенофазовый анализ; термogravиметрический анализ; электронная микроскопия; портландит, твердение; структура; плотность.

**Для цитирования:** Демьяненко О.В., Копаница Н.О., Саркисов Ю.С., Горленко Н.П. Исследование свойств цементного камня с комплексной добавкой // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 4. С. 147–156.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-147-156

*O.V. DEM'YANENKO, N.O. KOPANITSA,**Yu.S. SARKISOV, N.P. GORLENKO,**Tomsk State University of Architecture and Building*

## PROPERTIES OF HYDRATED CEMENT WITH COMPLEX ADDITIVE

The paper presents the results of physical and chemical studies of hardening products in the cement-complex additive-water system. The choice of the modifying additive is based on the structural and chemical affinity of the additive fragments with cement, which includes highly dispersed Tarkosil Ts-38 microsilica and MT-600 peat additive. The synergistic effect of the complex additive leads to a significant improvement in the performance characteristics of hydrated cement: strength, frost resistance, water resistance, and others. Physicochemical analysis shows that the introduction of the complex additive increases the density of hydrated cement due to the formation of low-basic hydrated silicates and their kinds, such as afwillite, fo-shagite, and truscottite.

**Keywords:** cement paste; complex additive; strength; performance characteristics; synergistic effect; X-ray phase analysis; thermogravimetric analysis; electron microscopy; portlandite; hardening; structure; density.

**For citation:** Dem'yanenko O.V., Kopanitsa N.O., Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P. Issledovanie svoystv tsementnogo kamnya s kompleksnoi dobavkoi [Properties of

hydrated cement with complex additive]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 4. Pp. 147–156.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-147-156

### Введение

Композиционные материалы на основе цементных вяжущих являются наиболее распространенными строительными материалами, продукты твердения которых состоят из аморфной фазы, кристаллов размерами от нано- до микрометров и связанной воды. Их твердение осуществляется в многомасштабном диапазоне (от нано- до микро- и макроуровней), что затрудняет однозначное понимание многообразных явлений в твердеющих системах. Использование современных физико-химических методов исследований при изучении процессов гидратации, твердения цементных систем позволит достаточно аргументированно развивать и уточнять механизмы протекающих здесь процессов.

Следует отметить, что в производстве таких материалов весьма актуальной является проблема улучшения различных эксплуатационных характеристик изделий на их основе, одним из путей решения которой является введение химических добавок [1–3], в том числе с использованием природных компонентов, таких, например, как микрокремнезем и торф [4–7]. Ранее нами была доказана высокая эффективность комплексной добавки на основе нанодисперсного кремнезема (таркосил Ts-38) и термомодифицированного торфа (МТ-600) на свойства цементных систем как в ранние, так и поздние сроки структурообразования [2, 5, 8]. В работе приводятся результаты физико-химических исследований продуктов твердения, таких как рентгенофазовый, термогравиметрический анализы и электронная микроскопия.

Целью исследования является оценка механизма действия комплексной добавки на процессы гидратации и твердения цементных систем.

### Материалы и методы

При проведении экспериментов были использованы следующие материалы. Портландцемент класса ЦЕМ I-42, 5 Н.

Добавка наноразмерного диоксида кремния Ts-38, полученная способом испарения вещества под действием электронного пучка, создаваемого электронным ускорителем. Удельная поверхность  $38 \text{ м}^2/\text{г}$  [9].

Добавка термомодифицированного торфа (МТ-600), химический состав которого включает макрокомпоненты кремния, алюминия, углерода и кальция.

Добавки Ts-38 и МТ-600 при концентрациях 0,03 и 0,5 масс. % соответственно тщательно перемешивали с цементом в сухом состоянии, а затем затворяли дистиллированной водой ( $\text{pH} = 6.8\text{--}7.0$ ). Смесь вновь перемешивали до однородной массы и формировали образцы-кубики размером  $(2 \times 2 \times 2)10^{-3} \text{ м}$ , которые испытывали на прочность при сжатии в 1, 3, 7 и 14 сут. Для определения прочности при изгибе готовились образцы – балочки размером  $(4 \times 4 \times 16)10^{-3} \text{ м}$ . После 28 сут твердения образцов проводили физико-химический анализ продуктов твердения.

Фазовый состав образцов исследовался на дифрактометре XRD-6000 (Shimadzu, Япония) на CuK $\alpha$ -излучении. Анализ фазового состава проведен с использованием баз данных PCPDFWIN и PDF-4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDERCELL 2.5. Рентгенофазовый анализ (РФА) применяли для исследования фазового состава цементного камня и определения степени его гидратации. Готовились пробы мелкодисперсного порошка цементного камня после 28 суток твердения и определяли минералы, входящие в состав образца. Каждый минерал обладает определенным набором пиков со своей интенсивностью, а гетерогенный образец порошка цементного камня включает в себя сумму рентгенограмм отдельных минералов.

Для исследования процесса гидратации и изменений гидратных новообразований цементного камня проводился термографический анализ порошка цементного камня. Дериватографический анализ осуществлялся с помощью прибора STA 449 F3 Jupiter. Это совмещенный ТГА/ДСК/СТА анализатор, который позволяет одновременно регистрировать изменения массы образца и процессы, сопровождающиеся выделением или поглощением тепла. Синхронный термический анализ позволяет проводить термогравиметрические и калориметрические измерения на одном образце и в одном приборе.

Электронно-микроскопический анализ и анализ элементного состава добавок осуществлялся с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM 6000 в режимах обратно рассеянных и вторичных электронов и режиме элементного анализа.

Удельная поверхность и средний размер частиц порошков измерялись прибором ПСХ-10а.

### Обсуждение результатов

Результаты испытаний исследуемых образцов на прочность при сжатии и изгибе приведены на рис. 1, 2.

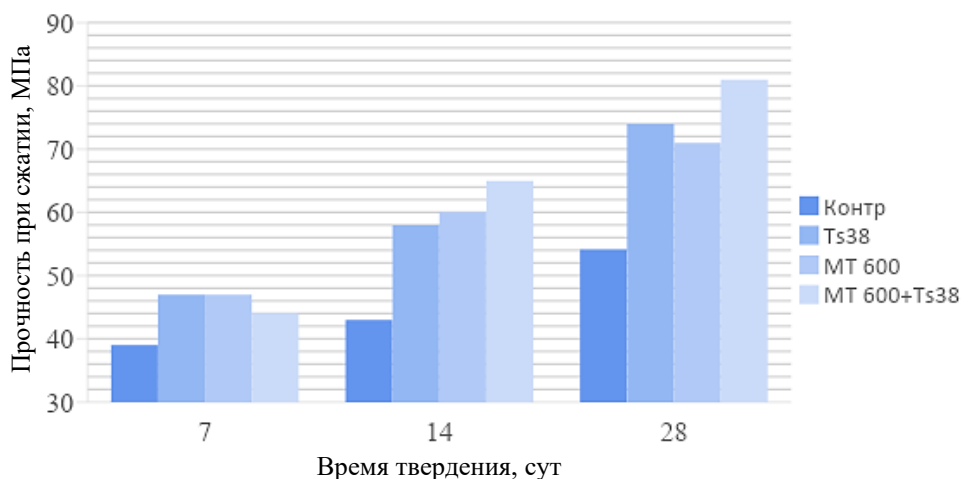


Рис. 1. Влияние комплексной добавки MT-600 и Ts-38 на прочность цементного камня при сжатии

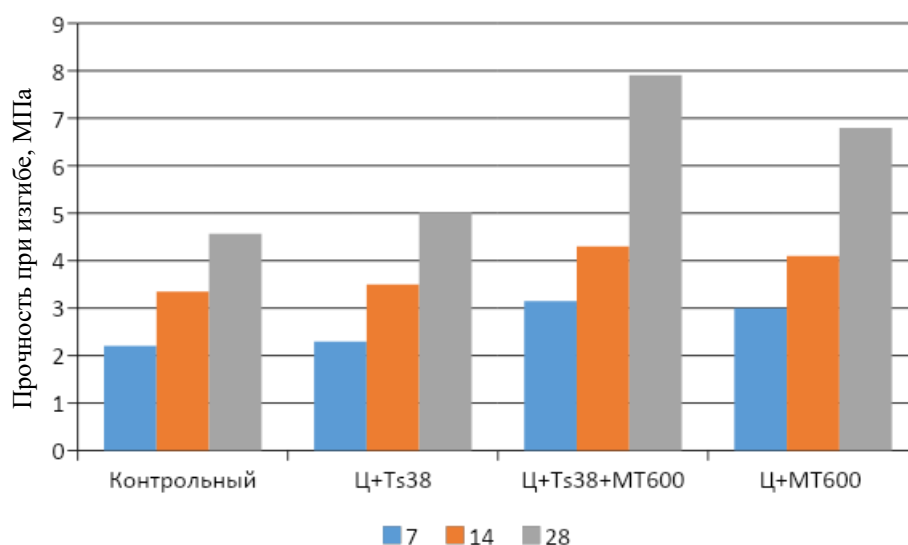


Рис. 2. Влияние комплексной добавки MT-600 и Ts-38 на прочность цементного камня при изгибе

Анализ результатов, представленных на рис. 1 и 2, позволяет сделать вывод об эффективности предложенной комплексной добавки, состоящей из MT-600 (0,5 %) и Ts-38 (0,03 %) по критерию повышения прочности цементного камня (ЦК). Прочность при сжатии повышается на 54 % по сравнению с контрольными образцами в поздние сроки твердения (28 сут). В ранние сроки твердения (до 7 сут) прочность модифицированного комплексной добавкой цементного камня выше контрольного на 12 %, добавка термомодифицированного торфа повышает прочность ЦК на 20 %. Прочность при изгибе в 28 суткам твердения с введением комплексной добавки повышается на 70 %. Таким образом, можно предполагать, что присутствие наноразмерного диоксида кремния в комплексной добавке ускоряет набор прочности ЦК в ранние сроки твердения.

Для исследования процессов структурообразования, фазового состава модифицированного ЦК и определения степени его гидратации были проведены термогравиметрический и рентгенофазовый анализы (рис. 3–6).

Эндоэффекты при 123,2 °С (рис. 3) связаны с удалением слабосвязанной воды с поверхности частицы. Эндоэффекты при 480 °С практически ничем не отличаются и, вероятно, обусловлены процессами разложения минеральных составляющих торфа.

На рис. 4 на дериватограмме цементного камня с комплексной добавкой MT-600 и нано-SiO<sub>2</sub> к 28 суткам твердения зафиксирован эндоэффект при 100 °С, что связано с удалением свободной воды, с потерей в массе 7,41 %. Также эндоэффекты наблюдаются при 448 °С с потерей в массе 2,90 % и площадью пика 139 Дж/г, что соответствует дегидратации Са(ОН)<sub>2</sub> и связыванию его в гидросиликаты кальция. Последний эндоэффект наблюдается при 667 °С с потерей массы в 3,24 % и площадью пика 63,3 Дж/г, что свидетельствует

о более высокой степени закристаллизованности цементной матрицы CSH-фазами. Анализ дифрактограмм (рис. 5, 6) цементного камня с добавкой MT-600 и цементного камня с комплексной добавкой MT-600 и Ts-38 показывает, что с введением добавок на основе термически обработанного торфа в гидратированном цементе идентифицируются дополнительные пики низкоосновных гидросиликатов кальция, сходных по структуре с афвиллитом  $C_3S_2H_3$  ( $d/n$  1,924;  $2,44 \cdot 10^{-10}$  м), фошагитом  $C_4S_3H$  ( $d/n$  1,82;  $1,55 \cdot 10^{-10}$  м). Кроме того, в модифицированном цементном камне появляются пики тоберморитободобных соединений  $C_5S_6H_5$  ( $d/n$  5,6;  $1,83 \cdot 10^{-10}$  м), а также соединений, сходных по структуре с минералом гиrolитовой группы трускоттитом  $C_6S_{10}H_3$  ( $d/n$  3,8; 2,63; 1,921;  $1,762$ ;  $1,557 \cdot 10^{-10}$  м).

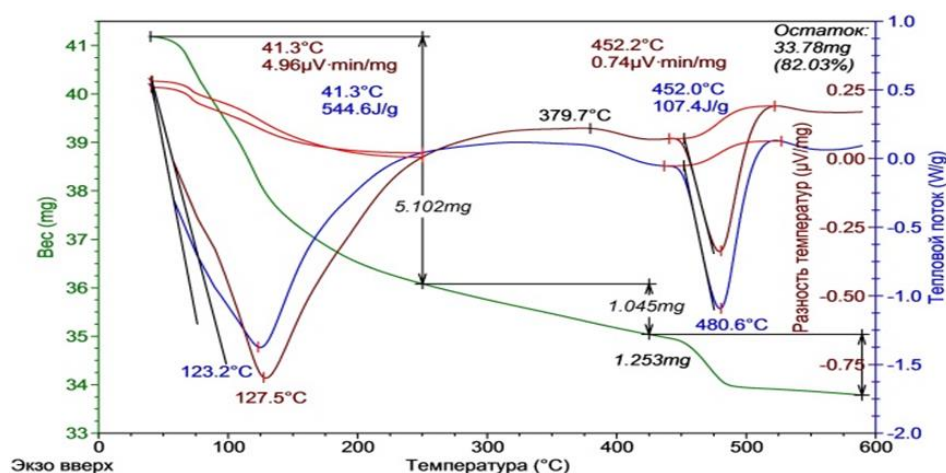


Рис. 3. Дериватограмма образца цементного камня с добавкой MT-600

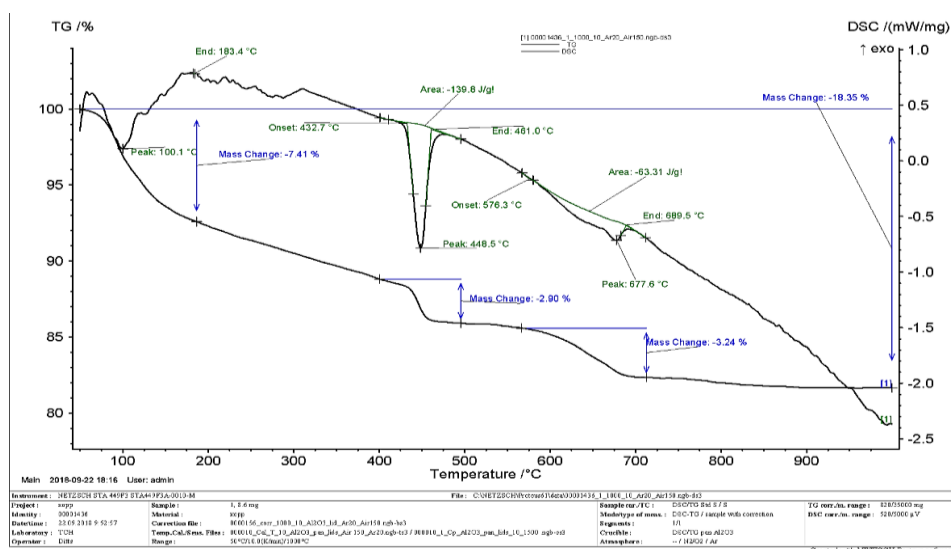


Рис. 4. Дериватограмма образца цементного камня с комплексной добавкой MT-600+Ts-38





ванного образца в незначительных количествах идентифицируется портландит, также наблюдается слоистая структура низкоосновных гидросиликатов кальция (елочкой). Пространство пор полностью закристаллизовано разрастающимися гидросиликатами, обеспечивающими плотную структуру, с образованием дополнительных подложек для центров кристаллизации. Такое «затягивание» пор позволит обеспечить повышение значений водонепроницаемости и морозостойкости в бетоне.

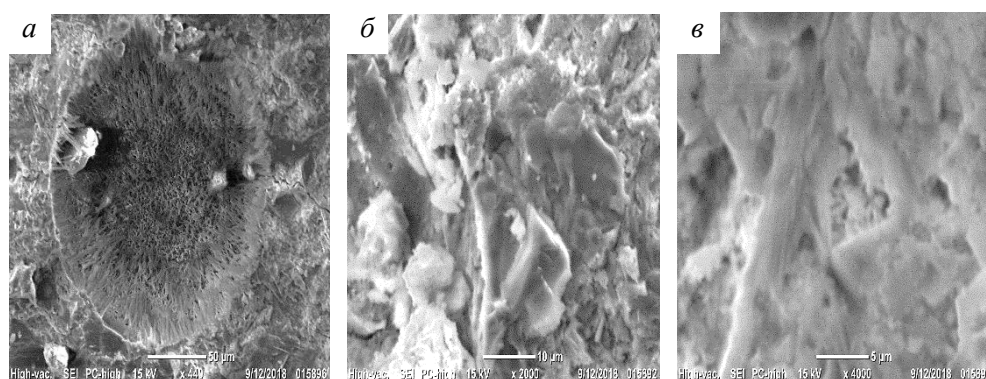


Рис. 7. Электронно-микроскопический снимок цементного камня, модифицированного комплексной добавкой МТ-600 и  $\text{nano-SiO}_2$  порового пространства. Увеличение:  $a - \times 440$ ;  $b - \times 2000$ ;  $v - \times 4000$

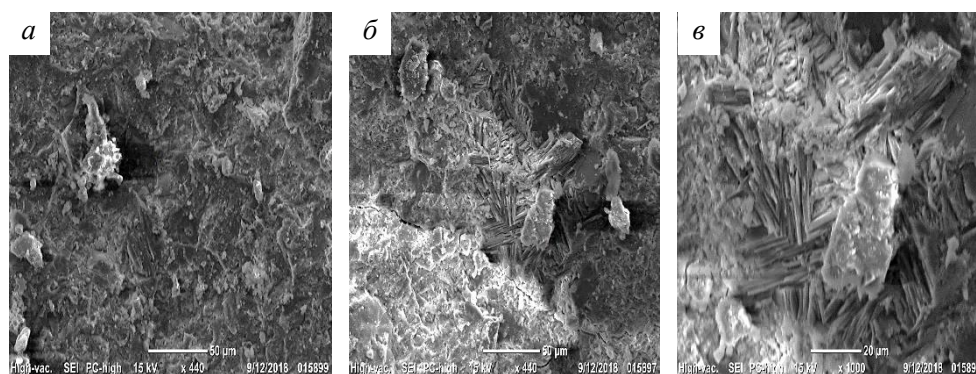


Рис. 8. Электронно-микроскопический снимок цементного камня, модифицированного комплексной добавкой МТ-600 и  $\text{nano-SiO}_2$  на поверхности скола образца. Увеличение:  $a - \times 440$ ;  $б - \times 440$ ;  $в - \times 1000$

Механизм синергетического эффекта действия комплексной добавки заключается, на наш взгляд, в следующем. Гидрофобная составляющая термомодифицированной добавки ТМТ-600 не только обеспечивает повышенную водостойкость системы, но и структурирует воду и уплотняет водородные связи. Благодаря родственным тетраэдрным структурам воды и микрокремнезёма Ts-38 значительно снижается энергия активации адсорбции воды

на активных центрах цементной матрицы. Исходя из теории подобия, высокодисперсный микрокремнезем обеспечивает возникновение когезионных связей и образование низкоосновных гидросиликатов кальция. Протонирование послойно сформированных адсорбционных пленок и проникновение воды вглубь зерен цемента способствует повышению степени гидратации и лавинному образованию структурообразующих веществ. Как следствие, наблюдается повышение прочности как в ранние, так и в поздние сроки образования.

### Выводы

Применение комплексной добавки МТ+Ts-38 позволило повысить прочность цементного камня при сжатии-изгибе и на изгиб на 50 и 70 % соответственно, а также снизить водопотребность смеси, т. к. добавка МТ-600 по своей структуре гидрофобная и не связывает воду. Эти результаты могут объясняться в том числе и участием добавки в формировании структуры цементного камня. Пространство пор цементного камня закристаллизовано разрастающимися гидросиликатами кальция, обеспечивающими плотную структуру, образуются дополнительные подложки центров кристаллизации. Ритмичность и периодичность процессов гидратации и структурообразования и формирования синергетического механизма влияния исследуемой комплексной добавки на свойства цементного камня обеспечивают его повышенные эксплуатационные характеристики.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rana Md Nasim, Islam Md Nazrul, Nath Suresh Kumar, Das Atanu Kumar, Ashaduz-zaman Md, Shams Md Iftekhar. Influence of chemical additive on the physical and mechanical properties of cement-bonded composite panels made from jute stick // *Journal of Building Engineering*. 2020. September 31. DOI: 10.1016/j.job.2020.101358.
2. Горшкова А.В. Сухие строительные смеси с модифицирующей добавкой на основе торфа : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Томск, 2015. 161 с.
3. Zaprudnov V, Sanaev V, Sergey, Karpachev S, Levushkin D, Gorbacheva G. *Materials Science Forum*. 2019. 972. P. 69–76. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.972.69.
4. Azadi Mohammad Reza, Taghichian Ali, Taheri Ali. Optimization of cement-based grouts using chemical additives // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017. 9(4). P. 623–637. DOI: 10.1016/.
5. Копаница Н.О., Саркисов Ю.С., Демьяненко О.В. Применение нанодисперсного кремнезема в производстве строительных смесей // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016. № 5 (58). С. 140–150.
6. Smyatskaya J, Voropai L, Sinitsyn A, Tikhonovskaya G, Yukhtarova O. Technology for Producing Peat Heat-Insulating Boards Using Organosilicon Polymers // *E3S Web of Conferences*. Publisher: EDP Sciences, 2020. 4/15. 161. 1–5.
7. Копаница Н.О., Сорокина Е.А., Демьяненко О.В. Влияние добавки термомодифицированного торфа на технологические свойства строительных смесей для 3d-печати // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018. № 4. С. 122–134.
8. Коренькова С.Ф. Добавки к бетонам // *Цементы, бетоны, строительные растворы и сухие смеси. Часть I : справочник*. Санкт-Петербург : НПО «Профессионал», 2007. С. 236–265.
9. Копаница Н.О., Саркисов Ю.С., Кудяков А.И. Стеновые строительные материалы на основе модифицированных торфов Сибири: монография. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2013. 295 с.

10. Kopanitsa N., Sarkisov Y., Gorshkova A., Demyanenko O. Additives for Cement Compositions Based on Modified Peat // AIP Conference Proceedings. 2016. 1698. 070015. 070015-0-070015-5.
11. Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Гамалий Е.А., Черных Т.Н., Зимич В.В. Модификаторы цементных бетонов и растворов (Технические характеристики и механизм действия). Челябинск : ООО «Искра-Профи», 2012. 202 с.

## REFERENCES

1. Rana Md Nasim, Islam Md Nazrul, Nath Suresh Kumar, Das Atanu Kumar, Ashaduzzaman Md, Shams Md Iftekhar. Influence of chemical additive on the physical and mechanical properties of cement-bonded composite panels made from jute stick. *Journal of Building Engineering*. 2020. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101358.
2. Gorshkova A.V. Sukhie stroitel'nye smesi s modifitsiruyushchei dobavkoi na osnove torfa: dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Dry building mixes with peat-based modifying additive. PhD Thesis]. Tomsk, 2015 161 p. (rus)
3. Zaprudnov V., Sanaev V., Karpachev S., Levushkin D., Gorbacheva G. *Materials science forum*. 2019. V. 972. Pp. 69–76. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.972.69.
4. Azadi Mohammad Reza, Taghichian Ali, Taheri Ali. Optimization of cement-based grouts using chemical additives. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017. V. 9. No. 4. Pp. 623–637.
5. Kopanitsa N.O., Sarkisov Yu.S., Dem'yanenko O.V. Primenenie nanodispersnogo kremnezema v proizvodstve stroitel'nykh smesey [Nanodispersed silicon dioxide used in the production of mix mortars]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 5 (58). Pp. 140–150. (rus)
6. Smyatskaya J., Voropai L., Sinitsyn A., Tikhonovskaya G., Yukhtarova O. Technology for producing peat heat-insulating boards using organosilicon polymers. *E3S Web of Conferences, EDP Sciences*. 2020. 4/15. 161. Pp. 1–5.
7. Dem'yanenko O.V., Kopanitsa N.O., Sorokina E.A. Vliyanie dobavki termomodifitsirovannogo torfa na tekhnologicheskie svoystva stroitel'nykh smesei dlya 3D-pechati [Performance characteristics of 3D printing construction mixes depending on thermally-modified peat additive]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018. V. 20. No. 4. Pp. 122–134. (rus)
8. Koren'kova S.F. Dobavki k betonam [Additives to concrete]. In: Tsementy, betony, stroitel'nye rastvory i sukhie smesi. Chast' I. Saint-Petersburg: Professional, 2007. Pp. 236–265. (rus)
9. Kopanitsa N.O., Sarkisov Yu.S., Kudiyakov A.I. Stenovye stroitel'nye materialy na osnove modifitsirovannykh torfov Sibiri: monografiya. Tomsk [Wall materials based on modified peat of Siberia]. Tomsk: TSUAB, 2013. 295 p. (rus)
10. Kopanitsa N., Sarkisov Y., Gorshkova A., Demyanenko O. Additives for Cement Compositions Based on Modified Peat. *AIP Conference Proceedings*. 2016. 1698. 070015. 070015-0-070015-5.
11. Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Gamalii E.A., Chernykh T.N., Zimich V.V. Modifikatory tsementnykh betonov i rastvorov (Tekhnicheskie kharakteristiki i mekhanizm deistviya) [Modifiers of cement concrete and solutions (Specifications and operation)]. Chelyabinsk: Iskra-Profi, 2012. 202 p. (rus)

## Сведения об авторах

Демьяненко Ольга Викторовна, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, demyanenko.olga.v@gmail.com

Копаница Наталья Олеговна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2,

Саркисов Юрий Сергеевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

Горленко Николай Петрович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

**Authors Details**

*Olga V. Dem'yanenko*, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, demyanenko.olga.v@gmail.com

*Natal'ya O. Kopanitsa*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kopanitsa@mail.ru

*Yuri S. Sarkisov*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia.

*Nikolay P. Gorlenko*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia.

# ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 628.31:628.35

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-157-167

*И.И. ИВАНЕНКО, Е.Я. ЛАПАТИНА,  
Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СУЛЬФАТА КАК ТЕРМИНАЛЬНОГО АКЦЕПТОРА ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ОКИСЛЕНИИ ТОЛУОЛА В АНАЭРОБНЫХ УСЛОВИЯХ**

Деструкцию насыщенных углеводородов в аэробных условиях осуществляют подавляющее большинство микроорганизмов. Анаэробной трансформации этих соединений, при реализации которой на очистных сооружениях будет достигнута существенная экономия средств на проведение процесса очистки сточных вод, посвящено небольшое количество исследований. В то же время среди аэробных культур-деструкторов нефтепродуктов встречаются штаммы, биохимические возможности которых включают способность использовать элементы с переменной валентностью как терминальные акцепторы электронов при окислении органических веществ, а способность разрушать алифатические углеводороды является определенным биохимическим признаком при идентификации некоторых из них.

Целью настоящего исследования являлось изучение способности селекционированной ассоциации иммобилизованных бактерий на волокнистом носителе использовать сульфат как терминальный акцептор электронов для окисления толуола.

Материалы и методы включают аналитическое обобщение результатов: обзор литературных источников, проведение лабораторных исследований по стандартным и современным методикам с использованием современного аналитического оборудования.

Анализ литературных исследований показал перспективность использования селекции микроорганизмов для расширения диапазона удаляемых загрязняющих веществ при биологической очистке, позволил определить основные направления интенсификации процессов путем иммобилизации активного ила на носителе. Селекция микроорганизмов – второй важный фактор интенсификации, и в лабораторных условиях исследованы способности микроорганизмов окислять толуол в бескислородных (анаэробных) условиях.

Проведенные исследования показали, что моноароматические углеводороды, а именно толуол, может быть трансформирован селекционированными ассоциациями микроорганизмов-деструкторов с использованием при окислении нитратов и сульфатов как терминальных акцепторов электронов.

**Ключевые слова:** углеводороды; толуол; селекция; бактерии; иммобилизация; расщепление ароматического кольца; денитрификация; анаэробные условия; волокнистый носитель.

*Для цитирования:* Иваненко И.И., Лапатина Е.Я. Использование сульфата как терминального акцептора электронов при окислении толуола в анаэробных условиях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 4. С. 157–167.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-157-167

*I.I. IVANENKO, E.Y. LAPATINA,  
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*

## SULFATE AS A TERMINAL ELECTRON ACCEPTOR IN TOLUENE OXIDATION IN ANAEROBIC CONDITIONS

In aerobic conditions, many of microorganisms cause decomposition of saturated hydrocarbons. Little publications are available relative to anaerobic transformation of these compounds, which provides substantial capital saving for waste water treatment. At the same time, cultures found among aerobic decomposers of petroleum products are characterized by the ability to use elements with variable valence as terminal electron acceptors in oxidation of organic substances. Their ability to decompose aliphatic hydrocarbons helps to identify some of them. **Purpose:** studying the ability of a selected association of immobilized bacteria on a fibrous carrier to utilize sulfate as a terminal electron acceptor for toluene oxidation. **Methodology/approach:** Analytical summarizing of results, literature review, laboratory research based on standard and modern up-to-date methodologies with the use of modern analytical equipment. **Findings:** The availability of using microorganism selection is shown for expanding the range of polluting strippants in biological purification; the main directions are determined for the process intensification by immobilization of active sludge on a fibrous carrier. The ability of microorganisms to oxidize toluene under oxygen-free (anaerobic) conditions is studied in the laboratory conditions. **Research implications:** monoaromatic hydrocarbons, toluene, in particular, can be changed by selected associations of decomposers using terminal electron acceptors in oxidation of nitrates and sulfates.

**Keywords:** hydrocarbons; toluene; selection; bacteria; immobilization; aromatic ring cleavage; denitrification; anaerobic conditions; fibrous carrier.

**For citation:** Ivanenko I.I., Lapatina E.Y. Ispol'zovanie sulfata kak terminal'nogo akseptora elektronov pri okislenii toluola v anaerobnykh usloviyakh [Sulfate as a terminal electron acceptor in toluene oxidation in anaerobic conditions]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 4. Pp. 157–167.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-157-167

### Введение

Биологическая трансформация углеводов в присутствии кислорода – известное и достаточно хорошо изученное явление [1]. В аэробных условиях большинство гетеротрофных микроорганизмов используют углеводородные соединения как единственный источник питания. Общеизвестно, что нефтепродукты миллионы лет надежно хранятся в подземных пластах при полностью пригодных для жизни температурных и других условиях для жизнедеятельности микроорганизмов, но при отсутствии кислорода. В то же время доказано, что кислород не является единственным и незаменимым акцептором электронов при микробном окислении углеводов, потому что существуют микроорганизмы, которые способны переносить электроны из

органических соединений на элементы с переменной валентностью, в частности на азот, серу, хром, железо, марганец, и т. п., в их частично или полностью окисленной форме [2].

**Актуальность темы исследований.** Моноароматические углеводороды, такие как толуол, бензол, этил-бензол, ксилол и другие, определяются в грунтовых водах часто в концентрациях, которые значительно превышают существующие водные стандарты и нормативы [3]. Практически повсеместное присутствие их является доказательством того, что естественные природные условия неблагоприятны для биологической трансформации этих загрязнений, и, прежде всего, это связано с отсутствием доступных акцепторов электронов для окисления углеводородов, питательных веществ, которые необходимы для нормального метаболизма клеток, а также высокоактивных культур бактерий с соответствующим метаболизмом.

**Обзор исследований.** Микробное расщепление углеводородов при отсутствии молекулярного кислорода в среде предопределяется наличием альтернативных акцепторов электронов, решающее значение для начала реакции трансформации углеводородов, скорости протекания этой реакции имеет величина окислительно-восстановительного потенциала среды, как показали исследования последних лет различных авторов. Например, в ходе исследований было установлено, что мутанты денитрифицирующих штаммов способны расти на толуоле и использовать его как единственный источник углерода и энергии [4]. Денитрифицирующая культура способна трансформировать толуол, м- и о-ксилол [5]. Деструкция толуола в культуре происходит также при использовании  $Mn(+4)$  как терминального акцептора электронов в строго анаэробных условиях [6]. Окисление толуола сопровождается выделением углекислого газа и снижением концентрации  $Mn(+4)$ . Количество образованного  $CO_2$  значительно меньше расчетных величин, т. к. часть толуола используется для синтеза биомассы. На каждый моль окисляемого толуола используется приблизительно 14 моль диоксида марганца. Скорость деструкции толуола была выше, когда культура непосредственно взаимодействовала с твердым диоксидом марганца, что связано со способностью бактерий прикрепляться к частицам диоксида. Это влияло на прямое и быстрое перенесение электронов с толуола на  $Mn(+4)$ . Авторами исследований отмечено, что после нескольких пересеваний культур их способность к окислению толуола  $Mn(+4)$  теряется. Эффективность расщепления толуола стимулируется внесением в культуральную среду дополнительных органических соединений, таких как щавелевая кислота. Авторы работы допускают, что переносчики электронов в  $Mn(+4)$  – редуцирующей культуре содержатся в клеточной оболочке и для роста бактерий необходим физический контакт с нерастворимым диоксидом марганца. Бактерии, которые используют  $Fe(+3)$  для окисления органических соединений, являются конкурентоспособными с сульфатредуцирующими бактериями при применении бензола как единственного источника углерода и энергии [7]. Исследователи считают, что использование окислов  $Mn(+4)$  и  $Fe(+3)$  как конечных акцепторов электронов в биотехнологических процессах защиты окружающей среды имеет большое значение, потому что эти соединения можно применять в замкнутом цикле окисления органических загрязнений.

Расщепление бензола также возможно селекционированной сульфатредуцирующей ассоциацией и сопровождается приростом биомассы этой популяции [8, 9]. В загрязненных же естественных природных условиях недостаточно эффективное расщепление бензола в сульфатнасыщенных зонах водоносных пластов может быть связано с отсутствием активных бензол-расщепляющих бактерий и другими неблагоприятными для их метаболизма условиями.

Алкилбензолы используются культурой сульфатредуцирующих бактерий в мезофильных условиях как единственный источник углерода [10]. Анализы ДНК изолированных штаммов обнаружили их идентичность культурам *Desulfobacterium cetonicum* та *Desulfosarcina variabilis*. Культуры способны к полной минерализации о- и м-ксилола в условиях сульфатредукции. Один из отделенных штаммов, близкий к *Desulfococcus multivorans*, будет утилизировать толуол, о-этилтолуол, м-изопропилтолуол, бензол, м-метилбензол. Изолированные штаммы растут в анаэробных условиях на неочищенном машинном масле, редуцируя сульфат в сульфид.

Эффективность и скорость протекания процесса биологической очистки зависит от концентрации активного ила в аэротенке, биореакторе, биотенке и ином сооружении биологической очистки сточных вод [11, 12]. Увеличение дозы активного ила является одним из возможных путей интенсификации работы биологических сооружений, а иммобилизация клеток-деструкторов загрязнителей на носителях – несомненно, новое, перспективное и сложное направление в технологии водоподготовки. Иммобилизация биоценоза имеет ряд преимуществ:

- одновременное присутствие свободноплавающего и иммобилизованного активного ила позволяет повысить окислительную мощность биореактора и очистной станции в целом [11];

- загрузка может увеличить производительность станции биологической очистки, улучшить и сделать возможным процесс очистки стоков от трудноокисляемых органических веществ [13];

- традиционный свободноплавающий активный ил может самоокисляться и загнивать при поступлении стоков в условиях крайне неравномерного характера. Иммобилизованный активный ил начинает терять влажность на воздухе, сохраняя жизнедеятельность организмов в течение некоторого периода времени. Хранение иммобилизованного ила в модулях на синтетической загрузке возможно в течение месяца и более в определенных условиях [14, 15];

- применение иммобилизованного ила приводит к повышению возраста ила и увеличивает общее время пребывания активного ила в системе, что, соответственно, повышает эффективность очистки, приводит к улучшению седиментационных и влагоотдающих свойств избыточного ила. Возраст активного ила на носителях больше, чем у свободноплавающего ила во взвешенном состоянии [13].

При использовании загрузок в сооружениях применяются синтетические материалы: ерши, петельчатые загрузки и другие пространственные структуры [16, 17]. В процессе эксплуатации загрузки подвержены «зарастанию», и для правильной их эксплуатации во избежание возможных вторичных загрязнений необходимо обеспечение периодической регенерации загрузки,



что требует дополнительных затрат и создает сложности при эксплуатации [18, 19]. Работ, посвященных способам регенерации синтетической инертной загрузки, существует немного, а еще меньше способов регенерации загрузок реализовано на практике, на очистных станциях. Все реализованные способы очистки загрузки трудоемки, энерго- и трудозатратны [20, 21].

Эффективность действия иммобилизованных микроорганизмов, так же как и свободноплавающих, зависит от большого ряда параметров биотехнологического процесса (рН, температуры, концентрации различных ионов, давления), которые должны соответствовать оптимальным условиям жизнедеятельности иммобилизованных микроорганизмов [22–24]. При иммобилизации клеток микроорганизмов путем прикрепления особое внимание следует уделять правильному подбору носителя [25]. Важность выбора носителя обуславливается целым рядом факторов – характеризующим как свойства носителя для возможности закрепления микроорганизмов (например, пористость), так и возможными изменениями свойств носителя с течением времени и под действием внешних, изменяющихся (например, прочность, деформация и т. д.). В качестве носителей для микроорганизмов возможно использовать как органические носители: древесные стружки или кору, керамзит, цеолит, гранулированный уголь, глину, вулканические породы [26], а также песок, торф, вермикулит и т. д., так и различные синтетические материалы: стекловолокно, капрон, корд и др. Органические, как правило, лучше работают при почвенных деструкциях, синтетические используются в основном для очистки сточных вод.

Таким образом, представленные научные исследования свидетельствуют о том, что микробное расщепление многих углеводов возможно в бескислородной среде. Его осуществляют многочисленные представители разных родов бактерий, которые относятся к факультативным, облигатно-анаэробным, а при некоторых условиях даже и к облигатно-аэробным группам микроорганизмов. Использование специальных сообществ микроорганизмов для трансформации загрязнений и применение их иммобилизованных форм для размещения в сооружениях биологической ступени очистки является весьма перспективным направлением интенсификации процесса с минимальными капитальными и эксплуатационными затратами.

Задачей настоящего исследования являлось изучение способности селектированной ассоциации иммобилизованных бактерий на волокнистом носителе использовать сульфат как терминальный акцептор электронов для окисления толуола.

**Материалы и методы.** Опыты проводили в лабораторном биореакторе объемом 3 дм<sup>3</sup> при непрерывном культивировании. В установке размещали волокнистый носитель из расчета 5 г/дм<sup>3</sup> с иммобилизированной ассоциацией бактерий – деструкторов нефтепродуктов. Количество биомассы на носителе равнялось 0,1 г на 1 г волокна (по сухой массе). С помощью перистальтического насоса в нижнюю часть лабораторного биореактора подавали минеральный раствор, приготовленный на основе водопроводной воды, который содержал источник фосфора для питания микроорганизмов и нитрат калия в концентрации 0,5 г/дм<sup>3</sup>. Водный раствор с сульфатом подавали в сооруже-

ние непрерывно с использованием перистальтического насоса, а толуол вносили периодически по 25 мг через каждые 2 ч. Концентрация сульфата составляла 300 мг/дм<sup>3</sup>. Контроль анаэробности среды проводили с помощью раствора индикатора – резазурина.

Селекцию бактерий, которые окисляют углеводороды альтернативным аэробному путем, проводили из биоценоза, который долгое время контактировал с этими соединениями при ограниченном доступе кислорода [27], для этого отобраны образцы почвы и воды вносили в загрязненную углеводородами воду. Из анаэробной денитрифицирующей ассоциации было выделено несколько штаммов бактерий, которые относятся к роду *Pseudomonas*. Они способны редуцировать нитратный азот до элементарного состояния и, как описано в литературе, могут восстанавливать Cr(+4) и сульфаты. Культуры идентифицированы как *P. mendocina* P-13, *P. fluorescens* var. *Pseudo-iodinum* P-11, *P. aeruginosa* P-1. С целью предотвращения диффузии кислорода на поверхности воды размещивали слой нефтепродуктов толщиной 2–2,5 см. В воду также добавляли источник фосфора, нитрат и сульфат как потенциальные акцепторы электронов. По мере прироста биомассы в растворе, которую определяли по оптической плотности, воду отбирали на анализ. В ходе исследований использовали расщепляющее действие иммобилизации селекционированного биоценоза на носителе из капронового волокна с гидрофобными свойствами. В ходе исследований проводилось изучение деструктивных свойств иммобилизованной ассоциации. Адгезия бактериальных клеток, которые выросли на углеводородах, протекала очень эффективно, потому что биомасса, которая вырастает, потребляя углеводороды, также имеет резко выраженные гидрофобные свойства.

После внесения в биореактор с волокнистым носителем, на котором иммобилизована селекционированная ассоциация микроорганизмов-деструкторов, минерального раствора с сульфатом и биогенными элементами, а также 50 мг/дм<sup>3</sup> толуола установка оставалась без протока до наступления облигатного анаэробноза. Об этом свидетельствовало обесцвечивание резазурина. В биореактор помещали также бактерии сульфатредукции, потому что толуол – очень токсичное соединение даже для сульфатредуктирующих бактерий. Кроме того, в ходе опытов следили за образованием черного осадка, который также является свидетельством протекания процесса сульфатредукции. Проточное культивирование в лабораторном биореакторе началось через 5 сут после его заполнения соответствующими растворами.

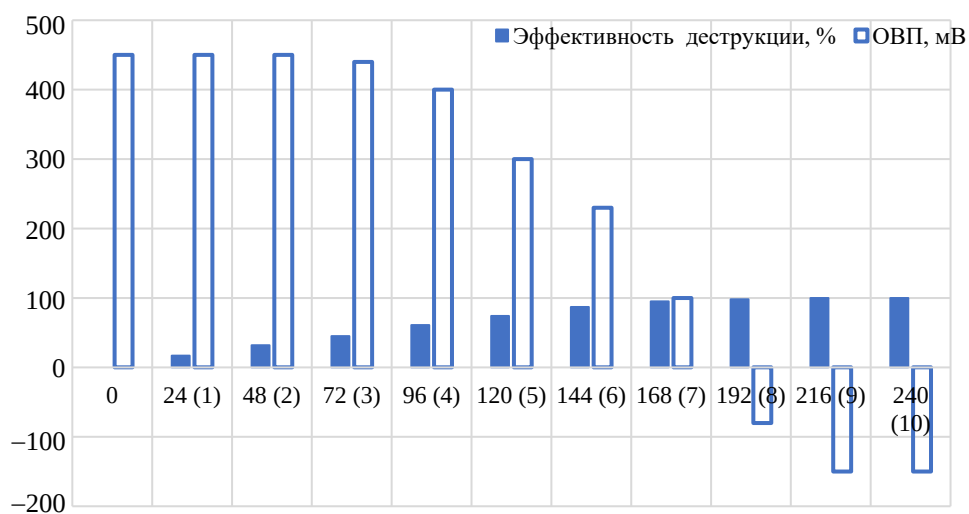
Концентрацию толуола в среде определяли на спектрофотометре Specord UV VIS с помощью салицилата натрия и нитритов реактивом Грисса [28, 29]. В ряде опытов использовался качественный анализ нитратов и нитритов в воде с использованием стандартных методик.

**Результаты исследований.** В таблице и на рисунке приведены результаты работы биореактора по очистке воды от толуола при условиях сульфатредукции. Как видно из таблицы, полное расщепление толуола в биореакторе наступает лишь через девять суток культивирования. За этот период происходит постепенное снижение окислительно-восстановительного потенциала

(ОВП) до  $-150$  мВ, причем в первые четверо суток значение ОВП оставалось неизменным на уровне  $450$  мВ.

### Эффективность окисления толуола сульфатредукцирующими бактериями

| Длительность культивирования, ч (сут) | Концентрация толуола в очищенной воде, мг/дм <sup>3</sup> | Эффективность деградации, % | ОВП, мВ |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|---------|
| 0                                     | 100                                                       | 0                           | 450     |
| 24 (1)                                | 99,5                                                      | 17                          | 450     |
| 48 (2)                                | 77                                                        | 32                          | 450     |
| 72 (3)                                | 65                                                        | 45                          | 440     |
| 96 (4)                                | 39                                                        | 61                          | 400     |
| 120 (5)                               | 26                                                        | 74                          | 300     |
| 144 (6)                               | 13                                                        | 87                          | 230     |
| 168 (7)                               | 5                                                         | 95                          | 100     |
| 192 (8)                               | 2                                                         | 98                          | -80     |
| 216 (9)                               | 0                                                         | 100                         | -150    |
| 240 (10)                              | 0                                                         | 100                         | -150    |



Результаты опытов по биологическому разложению толуола

### Заключение

Проведенные исследования показали, что моноароматические углеводороды, а именно толуол, может быть трансформирован селекционированными ассоциациями микроорганизмов-деструкторов с использованием при окислении нитратов и сульфатов как терминальных акцепторов электронов.

Деструкцию насыщенных углеводородов в аэробных условиях осуществляют подавляющее большинство микроорганизмов. Анаэробной же трансформации этих соединений посвящено небольшое количество исследований. В то же время среди аэробных культур – деструкторов нефтепродуктов – встречаются штаммы, биохимические возможности которых включают способность использовать элементы с переменной валентностью как терминальные акцепторы электронов при окислении органических веществ, а способность разрушать алифатические углеводороды является определенным биохимическим признаком при идентификации некоторых из них.

*Авторы благодарят руководство университета СПбГАСУ за предоставление гранта на проведенные исследования.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимергазина И.Ф., Переходова Л.С. К проблеме биологического окисления нефтепродуктов углеводородоокисляющими микроорганизмами // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Т. 7. С. 1–28.
2. Иваненко И.И., Новикова А.М., Духовской В.Д. Элементы с переменной степенью окисления при микробном окислении органических загрязнений воды // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 2 (78). С. 24–31. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.2.24-31.
3. *Перечень рыбохозяйственных нормативов (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды объектов, имеющих рыбохозяйственное назначение.* Москва : Изд-во ВНИРО, 1994. 304 с.
4. Coschigano P.W., Young L.Y. Identification and sequence analysis of two regulatory genes involved in anaerobic toluene metabolism by strain T1 // Appl. Envir. Microbiol. 1997. V. 63. № 2. P. 652–660.
5. Evans P.J., Mang D.T., Young L.Y. Degradation of toluene and m-xylene and transformation of o-xylene by denitrifying enrichment cultures // Appl. Envir. Microbiol. 1991. V. 57. P. 450–454.
6. Langenhoff A.A.M., Brouwers-Ceiler D.L., Engelberting J.H. et al. Microbial reduction of manganese coupled to toluene oxidation // FEMS Microbiology Ecology. 1997. V. 22. P. 119–127.
7. Kartik Dhar, Suresh R. Subashchandrabose, Kadiyala Venkateswarlu, Kannan Krishnan, Malavarapu Megharaj. Anaerobic Microbial Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: A Comprehensive Review // Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. 2019. V. 251. P. 25–108.
8. Rabus R., Fukui M., Wilkes H., Widdle F. Degradative capacities and 16S rRNA-targeted whole-cell hybridization of sulfate-reducing bacteria in an anaerobic enrichment culture utilizing alkylbenzenes from crude oil // Appl. Envir. Microbiol. 1996. V. 65. № 10. P. 2605–3613.
9. Lovley D.R., Cvates J.D., Woodward J.C., Phillips E.J. Benzene oxidation coupled to sulfate reduction // Appl. Envir. Microbiol. 1995. V. 61. P. 953–958.
10. Harms G., Zender P.C., Pabus P., et al. Anaerobic oxidation of o-xylene, m-xylene, and homologous alkylbenzenes by new types of sulfate-reducing- bacteria // Appl. Envir. Microbiol. 1999. V. 65. № 3. P. 999–1004.
11. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю., Камалов Р.Т. Использование иммобилизованного ила в аэротенке-биореакторе для интенсификации очистки сточных вод // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. № 1 (28). С. 90–97. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-1-90-97
12. Глебова М.А., Семенова Е.Н., Бахирева О.И. Иммобилизация активного ила как способ интенсификации биологической очистки // Химия. Экология. Урбанистика. 2019. № 1. С. 372–376.
13. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. Москва : АКВАРОС, 2003. 512 с.

14. Nadir Dizge, Berrin Tansel, Banu Sizerici. Process intensification with a hybrid system: A tubular packed bed bioreactor with immobilized activated sludge culture coupled with membrane filtration // *Chemical Engineering and Processing*. 2011. № 50. P. 766–772.
15. Туякбаева А.У. Использование иммобилизованных углеводородокисляющих микроорганизмов в очистке загрязненных сред // International Scientific Conference «Actual Questions and Innovations in Science» Craiova, Romania, May 12, 2019. С 103–107.
16. Пукемо М.М. Совершенствование контактных биореакторов для очистки сточных вод : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва : МГСУ, 1990. 160 с.
17. Ленденев В.С., Солопанов Е.Ю. Интенсификация биологической очистки сточных вод с использованием инертной ершовой загрузки // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2017. № 3 (22). С. 82–87.
18. Швецов В.Н., Морозова К.М., Смирнова И.И., Семенов М.Ю., Лежнев М.Л., Рыжаков Г.Г., Краснов А.А. Технологическая эффективность биозагрузки производства ООО «Техводполимер» // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2007. № 2. С. 33–40.
19. Швецов В.Н., Морозова К.М., Смирнова И.И., Семенов М.Ю., Лежнев М.Л., Рыжаков Г.Г., Губайдуллин Т.М. Использование блоков биологической загрузки на сооружениях очистки сточных вод // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2010. № 10. Ч. 2. С. 25–31.
20. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю., Сосна В.М. Регенерация синтетической загрузки в биореакторе // *Известия вузов. Строительство*. 2013. № 1. С. 92–101.
21. Rania Ahmed Hamza, Zhiya Sheng, Oliver Terna Iorhemen, Mohamed Sherif Zaghloul, Joo Hwa Tay. Impact of food-to-microorganisms ratio on the stability of aerobic granular sludge treating high-strength organic wastewater. // *Water research*. 2018. V. 147. P. 287–298.
22. Демидова Ю.Е. Иммобилизация клеток микроорганизмов // *Научно-технический сборник*. № 35. Москва, 2001. С. 112–115.
23. Синицын А.П., Райнина Е.И., Лозинский В.И. и др. Иммобилизованные клетки микроорганизмов. Москва : Изд-во МГУ, 1994. 288 с.
24. Вебб К. Иммобилизованные клетки: экологическая биотехнология. Ленинград : Химия, 1990. С. 166–189.
25. Коваленко Г.А., Кузнецова Е.В., Ленская В.М. Углеродминеральные носители для адсорбционной иммобилизации растущих бактериальных клеток // *Биотехнология*. 1998. № 1. С. 47–56.
26. Никовская Г.Н. Адгезионная иммобилизация микроорганизмов в очистке воды // *Химия и технология воды*. 1989. Т. 11. № 2. С. 158–169.
27. Иваненко И.И. Исследование особенности дыхания бактерий // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 62. С. 155–160.
28. Аналитическая химия промышленных сточных вод / под ред. Ю.Ю. Лурье. Москва : Химия, 1984. 448 с.
29. Унифицированные методы анализа вод / под ред. Ю.Ю. Лурье. Москва : Химия, 1971. 376 с.

## REFERENCES

1. Timergazina I.F., Perekhodova L.S. K probleme biologicheskogo okisleniya nefteproduktov uglevodorodookislyayushchimi mikroorganizmami [Biological oxidation of petroleum products by hydrocarbon-oxidizing microorganisms]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*. 2012. V. 7. Pp. 1–28. (rus)
2. Ivanenko I.I., Novikova A.M., Duhovskoj V.D. Elementy s peremennoj stepen'yu okisleniya pri mikrobnom okislenii organicheskikh zagryaznenij vody [Variable oxidation elements for microbial oxidation of organic water contaminants]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*. 2019. No. 2 (78). Pp. 24–31. (rus) DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.2.24-31
3. Perechen' rybo-hozyajstvennykh normativov (PDK) i orientirovochno bezopasnyh urovnej vozdeystviya (OBUV) vrednykh veshchestv dlya vody ob"ektov, imeyushchih rybo-hozyajstvennoe naznachenie [List of fishery regulations and approximately safe levels of exposure to harmful substances in water of fisheries management facilities]. Moscow: VNIRO, 1994. 304 p. (rus)

4. Coschigano P.W., Young L.Y. Identification and sequence analysis of two regulatory genes involved in anaerobic toluene metabolism by strain T1. *Applied and Environmental Microbiology*. 1997. V. 63. No. 2. Pp. 652–660.
5. Evans P.J., Mang D.T., Young L.Y. Degradation of toluene and m-xylene and transformation of o-xylene by denitrifying enrichment cultures. *Applied and Environmental Microbiology*. 1991. V. 57. Pp. 450–454.
6. Langenhoff A.A.M., Brouwers-Ceiler D.L., Engelberting J.H., et al. Microbial reduction of manganese coupled to toluene oxidation. *FEMS Microbiology Ecology*. 1997. V. 22. Pp. 119–127.
7. Kartik Dhar, Suresh R. Subashchandrabose, Kadiyala Venkateswarlu, Kannan Krishnan, Mallavarapu Megharaj. Anaerobic microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons: A comprehensive review. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2019. V. 251. Pp. 25–108.
8. Rabus R., Fukui M., Wilkes H., Widdle F. Degradative capacities and 16S rRNA-targeted whole-cell hybridization of sulfate-reducing bacteria in an anaerobic enrichment culture utilizing alkylbenzenes from crude oil. *Applied and Environmental Microbiology*. 1996. V. 65. No. 10. Pp. 2605–3613.
9. Lovley D.R., Cvates J.D., Woodward J.C., Phillips E.J. Benzene oxidation coupled to sulfate reduction. *Applied and Environmental Microbiology*. 1995. V. 61. Pp. 953–958.
10. Harms G., Zender P.C., Pabus P., et al. Anaerobic oxidation of o-Xylene, m-Xylene, and homologous alkylbenzenes by new types of sulfate-reducing- bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*. 1999. V. 65. No. 3. Pp. 999–1004.
11. Kul'kov V.N., Solopanov E.Yu., Kamalov R.T. Ispol'zovanie immobilizovannogo ila v aerotenkebioreaktore dlya intensivatsii ochestki stochnyh vod [Immobilized sludge in aerotank bioreactor for intensification of wastewater treatment]. *Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2019. V. 9. No. 1 (28). Pp. 90–97. (rus)
12. Glebova M.A., Semenova E.N., Bahireva O.I. Immobilizatsiya aktivnogo ila kak sposob intensivatsii biologicheskoy ochestki [Immobilization of active sludge for intensification of biological purification]. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika*. 2019. No. 1. Pp. 372–376. (rus)
13. Zhmur N.S. Tekhnologicheskie i biokhimicheskie processy ochestki stochnyh vod na sooruzheniyah s aerotenkami [Technological and biochemical processes for wastewater treatment in aerotank facilities]. Moscow: AKVAROS, 2003. 512 p. (rus)
14. Nadir Dizge, Berrin Tansel, Banu Sizerici. Process intensification with a hybrid system: A tubular packed bed bioreactor with immobilized activated sludge culture coupled with membrane filtration. *Chemical Engineering and Processing*. 2011. No. 50. Pp. 766–772.
15. Tuyakbaeva A.U. Ispol'zovanie immobilizovannyh uglevodorodokislyayushchih mikroorganizmov v ochestke zagryaznennyh sred [Immobilized hydrocarbon-oxidizing microorganisms in cleaning contaminated media]. *Proc. Int. Sci. Conf. 'Actual Questions and Innovations in Science'*. Craiova, Romania, 2019. Pp. 103–107. (rus)
16. Pukemo M.M. Sovershenstvovanie kontaktnykh bioreaktorov dlya ochestki stochnykh vod: dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Immobilized hydrocarbon-oxidizing microorganisms in cleaning contaminated media. PhD Thesis]. Moscow: MGSU, 1990. 160 p. (rus)
17. Lendenev V.S., Solopanov E.Yu. Intensifikatsiya biologicheskoy ochestki stochnyh vod s ispol'zovaniem inertnoy ershvoy zagruzki [Waste water biological treatment intensification using brush loading]. *Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2017. No. 3 (22). Pp. 82–87. (rus)
18. Shvecov V.N., Morozova K.M., Smirnova I.I., Semenov M.Yu., Lezhnev M.L., Ryzhakov G.G., Krasnov A.A. Tekhnologicheskaya effektivnost' biozagruzki proizvodstva OOO "Tekhvodpolymer" [Efficiency of biological loading manufactured by OOO "Tekhvodpolymer"]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2007. No. 2. Pp. 33–40. (rus)
19. Shvecov V.N., Morozova K.M., Smirnova I.I., Semenov M.Yu., Lezhnev M.L., Ryzhakov G.G., Gubajdullin T.M. Ispol'zovanie blokov biologicheskoy zagruzki na sooruzheniyah ochestki stochnyh vod [Biological loading units in wastewater treatment facilities]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2010. V. 2. No. 10. Pp. 25–31. (rus)

20. Kul'kov V.N., Solopanov E.Yu., Sosna V.M. Regeneracii sinteticheskoy zagruzki v bioreaktore [Regeneration of synthetic loading in bioreactor]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2013. No. 1. Pp. 92–101. (rus)
21. Hamza R.A., Sheng Z., Iorhemen O.T., Zaghloul M.S., Tay J.H. Impact of food-to-microorganisms ratio on the stability of aerobic granular sludge treating high-strength organic wastewater. *Water Research*. 2018. V. 147. Pp. 287–298.
22. Demidova Yu.E. Immobilizaciya kletok mikroorganizmov [Immobilization of microorganism cells]. *Nauchno-tehnicheskij sbornik*. 2001. No. 35. Pp. 112–115. (rus)
23. Sinicyn A.P., Rajnina E.I., Lozinskij V.I., et al. Immobilizovannye kletki mikroorganizmov. [Immobilized microorganism cells]. Moscow: MSU, 1994. (rus)
24. Vebb K. Immobilizovannye kletki: ekologicheskaya biotekhnologiya [Immobilized cells: Environmental biotechnology]. Leningrad: Khimiya, 1990. Pp. 166–189. (rus)
25. Kovalenko G.A., Kuznecova E.V., Lenskaya V.M. Uglerodmineral'nye nositeli dlya adsorbcionnoj immobilizacii nerastushchih bakterial'nyh kletok [Carbon-mineral carriers for adsorption immobilization of non-growing bacterial cells]. *Biotekhnologiya*. 1998. No. 1. Pp. 47–56. (rus)
26. Nikovskaya G.N. Adgezionnaya immobilizaciya mikroorganizmov v ochildke vody [Adhesion immobilization of microorganisms in water purification]. *Khimiya i tekhnologiya vody*. 1989. V. 11. No. 2. Pp. 158–169. (rus)
27. Ivanenko I.I. Issledovanie osobennosti dyhaniya bakterij [Bacterial breathing characteristics]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2017. No. 62. Pp. 155–160. (rus)
28. Lur'e Yu.Yu. (Ed.) Analiticheskaya himiya promyshlennyh stochnyh vod [Analytical chemistry of industrial wastewater]. Moscow: Khimiya, 1984. 448 p. (rus)
29. Lur'e Yu. Yu. (Ed.) Unificirovannye metody analiza vod [Unified methods of water analysis]. Moscow: Khimiya, 1971. 376 p. (rus)

#### Сведения об авторах

*Иваненко Ирина Ивановна*, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4, i5657@mail.ru

*Лапатина Елена Яковлевна*, химик-микробиолог, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4

#### Authors Details

*Irina I. Ivanenko*, PhD, A/Professor, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia, i5657@mail.ru

*Elena Ya. Lapatina*, Assistant Lecturer, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia

# ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.131.7

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-168-179

*Ю.В. ГРИГОРЬЕВА, Ю.И. ИГНАТОВА, А.Г. ЧУГУНОВ,  
Д.С. КЛИМЕНТЬЕВ, А.П. КОРОЛЁВА,  
АО «ТомскНИПИнефть»*

## **РАЗРАБОТКА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ РАСЧЕТА НОРМАТИВНЫХ ГЛУБИН ПРОМЕРЗАНИЯ (ОТТАИВАНИЯ)**

При проектировании поверхностного обустройства месторождений в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов необходимо применение современных проектных решений и новых программных продуктов.

Для изучения многолетнемерзлых грунтов необходимы качественные и достоверные инженерные изыскания, направленные на установление основных факторов инженерно-геокриологических условий. Одной из важнейших характеристик геокриологических условий является глубина сезонного промерзания (оттаивания) грунтов.

Согласно требованиям СП 22.13330 расчет глубин промерзания (оттаивания) при отсутствии данных многолетних наблюдений допускается определять на основе теплотехнических расчетов. Данный расчет связан с параллельным определением физических и теплофизических параметров грунта, корректным выбором климатической станции, с необходимостью внесения климатических данных.

Использование модуля по расчету нормативных глубин оттаивания (промерзания) позволяет оптимизировать эти расчеты. В статье описывается алгоритм работы программного модуля и преимущества его использования.

**Ключевые слова:** нормативная глубина оттаивания; нормативная глубина промерзания; метеостанция; температура воздуха; многолетнемерзлые грунты; задача Стефана; теплофизические параметры грунтов; программный модуль.

**Для цитирования:** Григорьева Ю.В., Игнатова Ю.И., Чугунов А.Г., Климентьев Д.С., Королёва А.П. Разработка и практическое применение программного модуля для расчета нормативных глубин промерзания (оттаивания) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 4. С. 168–179.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-168-179



Yu.V. GRIGOREVA, Yu.I. IGNATOVA, A.G. CHUGUNOV,  
D.S. KLIMENTEV, A.P. KOROLYOVA,  
АО «TomskNIPIneft»

## SOFTWARE DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION FOR CALCULATION OF FREEZING/THAWING STANDARD DEPTH

During field facilities construction in permafrost conditions, it is necessary to use modern design solutions and new software products.

High-quality and reliable engineering surveys are required to study permafrost soils and identify the main factors of geotechnical engineering conditions. One of the most important characteristics of permafrost conditions is the standard depth of seasonal soil freezing/thawing.

According to the SNiP requirements, the depth calculation of the of freezing/thawing can be determined by using thermotechnical calculations in the absence long-term observation results. This calculation is associated with the conversion of one unit of measure to another, determination of physical and thermophysical parameters of soil, correct choice of a climate station, and data recording.

The proposed software for calculating the standard depths of thawing and freezing will allow optimizing the calculations. The paper describes the algorithm and advantages of the software operation and use.

**Keywords:** standard thawing depth; standard freezing depth; meteorological station; air temperature; permafrost soil; Stefan problem; thermophysical soil parameters; software development.

**For citation:** Grigoreva Yu.V., Ignatova Yu.I., Chugunov A.G., Klimentev D.S., Korolyova A.P. Razrabotka i prakticheskoe primeneniye programmnoy modulya dlya rascheta normativnykh glubin promerzaniya (ottaivaniya) [Software development and implementation for calculation of freezing/thawing standard depth]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 4. Pp. 168–179.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-168-179

### Введение

В последнее десятилетие в нефтегазовой отрасли, и в частности для ПАО «НК «Роснефть», актуален вопрос проектирования поверхностного обустройства месторождений в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов, сопряженный с изменчивостью и разнообразием геокриологических условий осваиваемых месторождений Восточной Сибири, Тюменской области и других северных регионов.

В частности, согласно схеме геокриологического районирования, месторождения Красноярского края расположены в зоне островного и редкоостровного распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) со средними годовыми температурами грунта от плюс 2 до минус 3 °С. Состав пород, слагающих многолетнемерзлые толщи в данной местности, включает суглинки, супеси, песок, щебень, песчаники, алевролиты, аргиллиты, туфы, доломиты, интрузии трапов. Мощность мерзлой толщи может достигать 100 м.

Месторождения же Ямало-Ненецкого автономного округа характеризуются расположением в зоне массивно-островного распространения ММГ со

средними годовыми температурами грунта от минус 1 до минус 3 °С. Состав пород, слагающих многолетнемерзлые толщи в данной местности, включает песчано-глинистые, глинисто-песчаные и органические грунты. Мощность мерзлой толщи может достигать 300 м [1].

Проектные решения следует принимать, учитывая сложность, неоднородность и разнообразие инженерно-геокриологических условий. Для их изучения необходимы качественные и достоверные инженерные изыскания, направленные на установление основных факторов инженерно-геокриологических условий – температурного режима, состава и состояния грунтов, описания закономерностей развития мерзлотных процессов, глубин сезонного промерзания (оттаивания) грунтов и др.

Значительный объем изыскательских работ, выполняемых силами АО «ТомскНИПИнефть», приходится на месторождения, находящиеся в зоне распространения ММГ. За последние годы объем проектно-изыскательских работ (ПИР) по данным регионам значительно увеличился и составил более половины от всех выполняемых изысканий (рис. 1).



Рис. 1. Объем инженерных изысканий, производимых АО «ТомскНИПИнефть» (с 2010 по 2018 г.)

Таким образом, одной из приоритетных задач, стоящих перед АО «ТомскНИПИнефть», являются инженерные изыскания в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, которые характеризуются весьма разнообразными инженерно-геокриологическими условиями.

Следует отметить тот факт, что из-за сезонных колебаний температуры, состава грунтов и ряда других факторов (наличие и уровень грунтовых и под-

земных вод, степень пучинистости грунта и пр.) в зимнее время грунты промерзают на некоторую глубину, а в теплое время года оттаивают. Эта глубина является глубиной сезонного промерзания или оттаивания грунтов. Глубины эти неодинаковы для различных регионов – от долей метра в южных районах и до 3–5 м в северных. Глубина сезонного промерзания (оттаивания) грунтов зависит от широтного и высотного расположения местности, продолжительности периода с отрицательной температурой и ее величины, влажности грунтов, их состава и других факторов, влияющих на теплообмен грунта с атмосферой и расположенными ниже породами. Наибольшее промерзание (оттаивание) отмечается в рыхлых грунтах с открытыми порами (пески, гравий), меньше промерзают (оттаивают) глинистые грунты. Глубина сезонного промерзания (оттаивания) грунта даже для одной и той же местности колеблется в значительных пределах. Это определяет температурный режим местности [2].

### Методики расчета

В связи с сезонными колебаниями температур в течение годового цикла наиболее достоверно определять глубину сезонного промерзания (оттаивания) грунта рекомендуется путем режимных наблюдений в скважинах.

Согласно нормативной документации нормативную глубину сезонного промерзания (оттаивания) грунта  $d_f$ , м, принимают равной средней из ежегодных максимальных глубин сезонного промерзания грунтов (по данным наблюдений за период не менее 10 лет) на открытой, оголенной от снега, растительного и торфяного покрова горизонтальной площадке при уровне подземных вод, расположенном ниже глубины сезонного промерзания грунтов.

Однако при проведении инженерных изысканий такая возможность отсутствует из-за временных ограничений проведения изысканий. В связи с этим при проектировании зданий и сооружений руководствуются требованиями п. 5.5.3 СП 22.13330 и приложения Г СП 25.13330, которые допускают определять эту глубину расчетным путем.

Также необходимо отметить, что полученная глубина сезонного промерзания (оттаивания) имеет большое значение при принятии проектных решений. Например, это касается расчёта высоты насыпи/осадки основания при оттаивании в зависимости от выбранного принципа использования грунтов. Согласно СП 25.13330, для определения высоты насыпи по принципу I необходимо предусматривать устройство теплоизоляционной подсыпки. Толщина подсыпки напрямую зависит от нормативной глубины сезонного оттаивания природного грунта и грунта подсыпки соответственно. Согласно СП 313.1325800.2017, для определения высоты насыпи по принципу II необходимо рассчитать строительную осадку, которая зависит от следующих параметров: коэффициента уплотнения грунтов основания, коэффициента оттаивания грунтов основания, удельного давления на поверхность грунта основания, плотности грунта основания, начального коэффициента пористости грунта основания и расчетной глубины оттаивания грунтов основания.

При определении глубины заложения фундамента зданий и сооружений нормативная глубина промерзания (оттаивания) также имеет большое значение:

чем больше величина деятельного слоя, тем больше будет воздействие от касательных сил морозного пучения. А в отношении фундаментов мелкого заложения (в особенности при отсутствии подвальных помещений) возможно проявление нормальных сил пучения, что отрицательно сказывается на их устойчивости.

При проектировании фундаментов по принципу I необходимо руководствоваться п. 6.2.2 СП 25.13330, согласно которому минимальную глубину заложения фундаментов рекомендуется принимать в зависимости от расчетной глубины сезонного оттаивания грунта. При использовании многолетнемерзлых грунтов в качестве основания по принципу II минимальную глубину заложения фундаментов следует принимать в соответствии с требованиями СП 22.13330 в зависимости от расчетной глубины сезонного промерзания грунта и уровня подземных вод.

Таким образом, значения нормативных глубин промерзания (оттаивания) являются обоснованием глубины заложения фундамента, высоты насыпи на промышленных площадках и других проектных решений.

Расчет глубин промерзания (оттаивания) согласно п. 5.5.3 СП 22.13330, при отсутствии данных многолетних наблюдений, следует определять на основе теплотехнических расчетов. Для районов, где глубина промерзания не превышает 2,5 м, ее нормативное значение зависит от суммы абсолютных значений среднемесячных отрицательных температур за год в данном районе.

Определение глубины в этом случае не составляет особенных трудностей, т. к. показатели среднемесячных отрицательных температур принимаются из метеорологических справочников или из СП 131.13330, в котором содержится перечень метеостанций с результатами наблюдений за климатическими параметрами за многолетний период. Но, тем не менее, основным спорным моментом при расчете нормативных глубин промерзания (оттаивания) согласно методике СП 22.13330 является выбор репрезентативной метеостанции для определения значений среднемесячных отрицательных температур. Основные параметры, которыми следует руководствоваться, – кратчайшее расстояние от объекта исследований до метеостанции и наличие всех требуемых для расчета климатических характеристик.

При проверке отчетов субподрядных организаций нередко выявляются разночтения в выборе метеостанции для одного и того же проектируемого объекта, несмотря на соответствие всем требуемым критериям. Вдобавок при прохождении Главгосэкспертизы результатов изысканий поступают замечания по выбору метеостанции или необходимости обновления климатических данных нормативных документов путем запроса справок с метеостанций, которые необходимо обновлять согласно требованиям п. 7.1.8 СП 47.13330.2016.

Из этого следует, что при расчете нормативных глубин промерзания (оттаивания) согласно СП 22.13330 корректный выбор репрезентативной метеостанции является первоочередной задачей.

В свою очередь, нормативную глубину промерзания (оттаивания) грунта в районах, где глубина промерзания превышает 2,5 м, а также в горных районах, где резко изменяются рельеф местности, инженерно-геологические и климатические условия, следует определять теплотехническим расчетом в соответствии с требованиями СП 25.13330, приложение Г. Данный расчет

учитывает теплофизические и физические параметры грунта, в том числе заторфованность и засоленность, климатические особенности территории. Методика расчета основывается на задаче Стефана с некоторыми уточнениями, касающимися температуры начала замерзания грунтов. При решении задачи предполагается, что в каждый момент времени распределение температуры в мерзлой (талой) зоне линейно, температура на поверхности грунта постоянна во времени, подстилающий талый (мерзлый) грунт имеет температуру, равную температуре начала замерзания, теплоемкость равна нулю. Другими словами, влажный грунт находится в талом состоянии и имеет всюду начальную температуру  $T_n$ , которая выше температуры замерзания  $T_\phi$  (температуры фазового перехода). В момент времени  $t=0$  на поверхности грунта  $x=0$  скачком устанавливается, а затем поддерживается температура  $T_0$ , которая ниже температуры замерзания  $T_\phi$ . В результате этого у поверхности грунта появляется промерзший слой, толщина которого со временем увеличивается. Требуется найти закон движения фронта промерзания и распределение температуры в промерзшей и талой зонах. Уравнение Стефана дает среднее значение максимальных глубин промерзания грунтов на открытой площадке без растительности и снега в течение 10 лет.

Для определения глубины промерзания (оттаивания) в реальном грунте исходят из условия линейной зависимости процесса от времени. То есть для решения задачи необходимо рассмотреть процесс промерзания однородного грунта и составить уравнение теплового баланса, результат решения которого и представлен в приложении Г СП 25.13330.

Таким образом, второй задачей при расчете нормативных глубин промерзания (оттаивания) является определение нормативных глубин промерзания (оттаивания) по результатам инженерных изысканий путем достаточно длительного расчета, связанного с переводом одних единиц измерения в другие, параллельного определения физических и теплофизических параметров грунта, корректного выбора климатической станции, с необходимостью внесения климатических данных.

### Результаты

Для решения этих задач в АО «ТомскНИПИнефть» был разработан программный модуль по расчету нормативных глубин промерзания (оттаивания), который не только позволяет автоматизировать расчет согласно методике СП 25.13330, но и помогает в корректном выборе метеостанций путем использования единого ГИС-сервера с необходимыми климатическими параметрами для расчета. Также настоящий модуль позволяет хранить данные по метеостанциям и результатам расчета по объектам с возможностью их передачи в единую базу ГИС-сервера.

Программный модуль представляет собой Excel VSTO Workbook. Иными словами, это .xlsm-файл с уникальной для этого файла надстройкой Excel, взаимодействие которых задаётся с помощью средств разработки VSTO.

Надстройка является по сути отдельным набором библиотек, основная из которых написана на языке C# 6.0 с использованием .NET Framework 4.6.1.

Она включает в себе логику ввода и обработки пользовательских данных, а именно проведение расчётов глубины промерзания (оттаивания) грунтов (для сложных математических расчётов используется библиотека численного анализа и обработки данных ALGLIB).

Программный модуль включает в себя набор предварительно форматированных вкладок: «Проекты», «Расчет грунта», «Данные сервера», используемых для просмотра и редактирования данных (рис. 2). Он не хранит пользовательские данные (только справочные расчётные таблицы) и не использует макросы. В целом это просто привычный интерфейс просмотра и взаимодействия с данными.



Рис. 2. Схема организации модуля

На сервере данных содержится информация о средней ежемесячной и годовой температуре воздуха по данным метеостанций согласно СП 131.13330.2012, а также по некоторым станциям температура обновлена согласно полученным справкам с метеостанций за последние годы исследований.

Обновление расчётных данных метеостанций с ГИС-сервера ведется посредством протокола Web Feature Service (WFS) стандарта Open Geospatial Consortium (OGC) и осуществляется путем выдачи права на администрирование метеостанций определенному пользователю, который сможет внести дополнительные данные по метеостанциям на сервер. При этом обновленные данные отобразятся у всех пользователей приложения. Такой функционал не только делает прозрачными исходные климатические данные для расчета, но и помогает вести единую базу по применяемым в расчете метеоданным. Например, если необходимо пополнить базу метеостанций данными о климатических параметрах по результатам запросов обновленных данных с метеостанций. Хранение данных пользователя осуществляется в локальной базе данных LiteDB.

Первый этап расчета – выбор метеостанции, по данным которой будут приняты исходные климатические параметры для расчета. Для этого достаточно задать широту и долготу объекта – в таком случае выбор метеостанции будет произведен автоматически: в выпадающем меню отобразится ближайшая метеостанция по указанным координатам объекта. Для сортировки и выбора станции используется расчёт геодезических линий по алгоритму Винсента. Однако если перед началом работ проведен анализ имеющихся станций в регионе работ и выбрана репрезентативная станция по данным инженерно-гидрометеорологических изысканий, то выбор станции можно осуществить по названию в специальном окне из выпадающего списка всех имеющихся станций.

После выбора метеостанции в программе автоматически рассчитаются климатические параметры согласно п. Г.8 СП 25.13330: средняя по многолетним данным температура воздуха в период отрицательных температур  $T_{f,m}$ , °С, расчетный период отрицательных температур  $t_{f,m}$ , с, средняя температура воздуха за период положительных температур (по метеоданным)  $T_{th,m}$ , °С, продолжительность периода положительных температур  $t_{th,m}$ , с, расчетная температура поверхности грунта в летний период  $T_{th,c}$ , °С, расчетный период положительных температур  $t_{th,c}$ , с.

Для расчета необходимы три климатических параметра, которые не постоянны для одного и того же месторождения, а определяются по данным натурных наблюдений: среднезимняя высота снегового покрова  $d_s$ , м, среднезимняя плотность снегового покрова  $\rho_s$ , т/м<sup>3</sup>, температура грунта для данной территории  $T$ , °С.

Остальные параметры возможно определить автоматически. К ним относятся значения среднезимней теплопроводности снегового покрова  $\lambda_s$ , Вт/м°С, и термическое сопротивление снегового покрова  $R_s$ , м<sup>2</sup>·°С/Вт.

В связи с необходимостью внесения различных по единицам измерения параметров, используемых в расчете, важной функциональной особенностью приложения является наличие конвертера единиц измерения для часто используемых физических величин. Это позволяет исключить ошибки, связанные с некорректным внесением исходных данных.

Следующий шаг использования программы – задание разновидности и обозначения грунта, для которого производится расчет. Например, номер инженерно-геологического элемента – «м340» (согласно отчету об инженерных изысканиях) и разновидность грунта – «суглинок пластичномерзлый слабодистый, при оттаивании мягкопластичный тяжелый». Вслед за этим во вкладке «Расчет грунта» отобразится выбранный грунт, для которого производится расчет.

Исходя из методики вычислений, основные закономерности промерзания (оттаивания) на конкретной площадке определяются условиями теплообмена на поверхности грунта, его составом и состоянием. Глубина промерзания (оттаивания) зависит в основном от следующих четырех характеристик: средних годовых температур грунтов, годовых амплитуд температур на поверхности, со-

става и влажности грунта. Поэтому необходимо внести данные лабораторных исследований по физическим и теплофизическим свойствам грунта.

Также необходимо отметить, что влажность за счет незамерзшей воды в мерзлых породах является существенным фактором, определяющим их физико-химические и механические свойства. Однако на сегодняшний день нет общепринятой единой методики и лабораторного оборудования для точного определения этого параметра.

Известны разные способы определения количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах: способ, основанный на измерении теплового эффекта при оттаивании образцов мерзлого грунта в калорифере; способ, который позволяет определить количество незамерзшей воды по температурам оттаивания предварительно замороженных образцов одного и того же грунта с различной исходной влажностью, и другие. Но каждый из способов или требует знания множества промежуточных параметров, или трудоемкий при измерении и обработке результатов. Поэтому при расчете нормативных глубин промерзания (оттаивания) приходится руководствоваться расчетными значениями влажности за счет незамерзшей воды.

Непосредственно сам расчет целесообразнее всего разбить на исходные показатели свойств грунта, а также теплофизические параметры и другие параметры грунта, необходимые для расчета глубин промерзания (оттаивания), согласно прил. Г СП 25.13330.

При этом исходные данные могут быть получены как по результатам лабораторных исследований, так и с использованием исходных теплофизических параметров, определенных согласно п. Б.7 СП 25.13330 с учетом п. 5.9 (рис. 3).

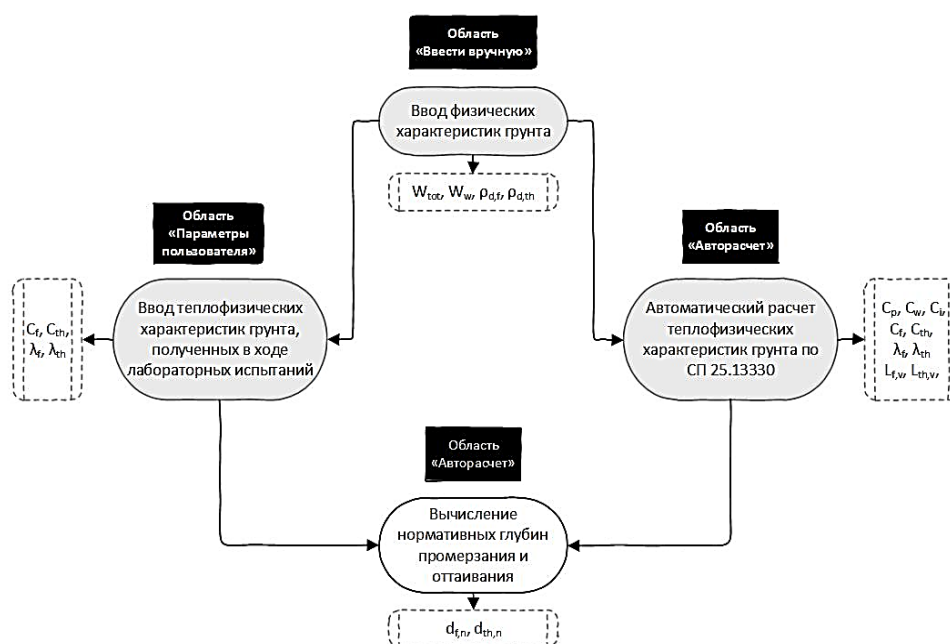


Рис. 3. Операции, выполняемые во вкладке «Расчет грунта»



Для расчета оснований сооружений II и III уровней ответственности, возводимых с сохранением мерзлого состояния грунтов, а также для выполнения предварительных расчетов оснований и привязки типовых проектов к местным условиям значения объемной теплоемкости засоленных и незасоленных грунтов допускается определять расчетным путем согласно формулам п. Б.6 и Б.9 СП 25.13330. В этих же случаях значение коэффициента теплопроводности незасоленных, засоленных и заторфованных грунтов в талом и мерзлом (для диапазона температур ниже  $T \leq$  минус 15 °С) состоянии допускается принимать по табл. Б.8 СП 25.13330 в зависимости от влажности, плотности скелета грунта и степени засоленности согласно ГОСТ 25100. Значения определяются с использованием интерполяции на нерегулярной сетке по методу радиальных базисных функций (RBF) для двумерного пространства с применением табличных значений как опорных точек.

Исходя из этих допусков, в приложении в области «Авторасчет» производится интерполяция значений коэффициента теплопроводности – Б.8 СП 25.13330, расчет значений объемной теплоёмкости в талом – согласно п. Б.7 СП 25.13330, теплота таяния (замерзания) – п. Б.8 СП 25.13330. Рассчитанные и интерполированные значения теплофизических свойств грунта используются в расчете искомых величин нормативных глубин промерзания (оттаивания) (рис. 4).

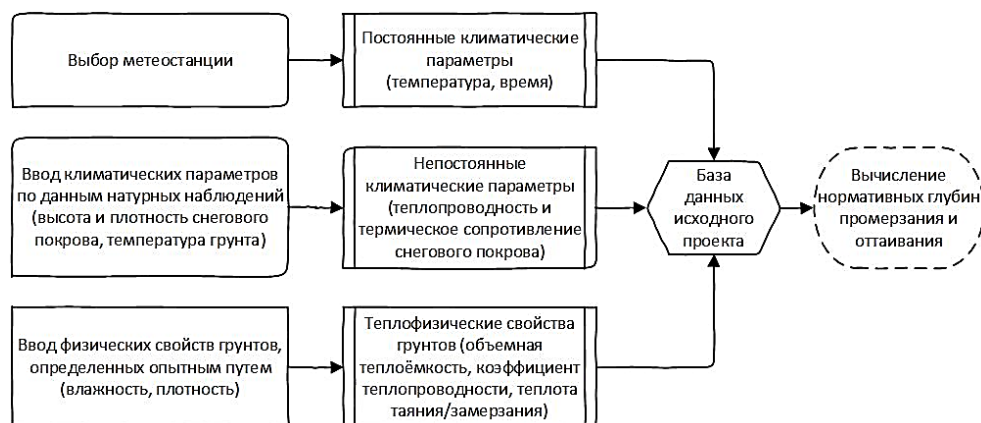


Рис. 4. Схема работы в модуле

Немаловажной функциональной особенностью модуля является вывод результатов расчетов. Для этого реализовано формирование двух типов отчетов – краткий, подробный. Краткий отчет представляет собой перечисление полученных величин нормативных глубин промерзания (оттаивания) в виде текста, подробный отчет содержит таблицы с исходными и промежуточными данными, полученными в ходе расчета (рис. 5).

Также следует отметить возможность импорта/экспорта данных. Все результаты произведенных расчетов, включая исходные данные, сохраняются на локальном диске пользователя, без привязки к общей базе ГИС-сервера. Для

обмена результатами расчетов с другими пользователями можно воспользоваться экспортом данных. Данная функция позволяет выбрать проекты и получить файл с данными по ним, который может быть передан по любому каналу связи. Для загрузки в локальное хранилище пользователь пользуется функцией импорта, указывает сформированный файл, также имея возможность выбрать проекты, которые он хочет загрузить. После чего все данные (исходные и результаты расчётов) будут находиться в локальном хранилище с указанием автора расчета. Таким образом, есть возможность вести базу расчетов глубин промерзания (оттаивания) по различным участкам месторождений.

| Наименование показателей                                                                                    | Ин-декс                | Ед. изм.                           | м340    | м350    | м420    | м430    | м530    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Средняя по многолетним данным температура воздуха за период отрицательных температур (СП 131.13330.2012)    | $T_{\text{ср.отриц.}}$ | °C                                 | -14.49  | -14.49  | -14.49  | -14.49  | -14.49  |
| Продолжительность периода отрицательных температур (СП 131.13330.2012)                                      | $t_{\text{отриц.}}$    | ч.                                 | 5832    | 5832    | 5832    | 5832    | 5832    |
| Средняя по многолетним данным температура воздуха за период положительных температур (СП 131.13330.2012)    | $T_{\text{ср.полож.}}$ | °C                                 | 11.3    | 11.3    | 11.3    | 11.3    | 11.3    |
| Средняя по многолетним данным температура воздуха за период положительных температур (Г.6 СП 25.13330.2012) | $T_{\text{ср.п.}}$     | °C                                 | 18.22   | 18.22   | 18.22   | 18.22   | 18.22   |
| Продолжительность периода положительных температур (Г.7 СП 25.13330.2012)                                   | $t_{\text{п.}}$        | ч.                                 | 3728.31 | 3728.31 | 3728.31 | 3728.31 | 3728.31 |
| Теплота замерзания грунта (Б.15 СП 25.13330.2012)                                                           | $Q_{\text{з}}$         | Дж/м <sup>3</sup> ·10 <sup>5</sup> | 582.9   | 864.3   | 507.06  | 736.87  | 1081.78 |
| Теплота таяния грунта (Б.15 СП 25.13330.2012)                                                               | $Q_{\text{т}}$         | Дж/м <sup>3</sup> ·10 <sup>5</sup> | 572.85  | 847.01  | 498.21  | 722.7   | 1060.98 |
| Нормативная глубина сезонного промерзания грунта (Г.9 СП 25.13330.2012)                                     | $d_{\text{н.п.}}$      | м                                  | 3.52    | 3.1     | 3.98    | 3.48    | 3.43    |
| Нормативная глубина сезонного оттаивания грунта (Г.3 СП 25.13330.2012)                                      | $d_{\text{н.от.}}$     | м                                  | 2.47    | 2.29    | 2.78    | 2.55    | 2.82    |

Рис. 5. Пример подробного отчета в виде таблицы с промежуточными параметрами расчета

В 2019 г. на данный модуль получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019619344. В настоящий момент модуль получил свое применение при составлении более чем 20 технических отчетов по результатам инженерно-геологических изысканий, выполненных в АО «ТомскНИПИнефть». Часть этих отчетов прошли проверку в Красноярском и Омском филиале ФАУ «Главное управление государственной экспертизы». Кроме того, данный модуль находит широкое применение при проверке результатов расчетов субподрядных организаций по принятию решений о высоте насыпи оснований промышленных площадок и обоснованию глубин заложения фундаментов.

### Заключение

Таким образом, в результате работы были рассмотрены вопросы корректного выбора метеостанций для расчета глубин промерзания (оттаивания) и предложен алгоритм автоматического подбора метеостанций для выбора климатических параметров и расчета нормативных глубин промерзания согласно методике СП 22.13330.

Исходя из методики расчета нормативных глубин промерзания (оттаивания), согласно методике СП 25.13330 выявлена необходимость автоматизирован-

ного расчета исходных климатических параметров, что было реализовано в программном продукте. Кроме этого, автоматизирована интерполяция и расчет теплофизических параметров согласно таблицам и формулам СП 25.13330. Вместе с тем реализована возможность расчета нормативных глубин промерзания (оттаивания) на основании физических и теплофизических параметров, полученных по данным лабораторных исследований. А также предусмотрен удобный вывод результатов расчетов, позволяющий формировать текстовую часть отчета об инженерно-геологических изысканиях.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Хрусталева Л.Н.* Основы геотехники в криолитозоне. Москва : Изд-во МГУ, 2005. 543 с.
2. *Ершов Э.Д.* Методы геокриологических исследований. Москва : Изд-во МГУ. 2004. 512 с.

#### REFERENCES

1. *Hrustalev L.N.* Osnovy geotekhniki v kriolitozone [Basics of geotechnical engineering in cryolithic zone]. Moscow: MSU, 2005. 543 p. (rus)
2. *Ershov E.D.* Metody geokriologicheskikh issledovaniy [Geocryological research methods]. Moscow: MSU. 2004. 512 p. (rus)

#### Сведения об авторах

*Григорьева Юлия Васильевна*, ведущий инженер, АО «ТомскНИПИнефть», 634027, г. Томск, пр. Мира, 72, GrigorevaYV@tomsknipi.ru

*Игнатова Юлия Игоревна*, инженер, АО «ТомскНИПИнефть», 634027, г. Томск, пр. Мира, 72, IgnatovaYI@tomsknipi.ru

*Чугунов Алексей Геннадьевич*, главный специалист, АО «ТомскНИПИнефть», 634027, г. Томск, пр. Мира, 72, ChugunovAG@tomsknipi.ru

*Климентьев Дмитрий Сергеевич*, начальник сектора, АО «ТомскНИПИнефть», 634027, г. Томск, пр. Мира, 72, KlimentevDS@tomsknipi.ru

*Королева Александра Павловна*, инженер-программист, АО «ТомскНИПИнефть», 634027, г. Томск, пр. Мира, 72, KorolevaAP@tomsknipi.ru

#### Authors Details

*Yuliya V. Grigoreva*, Leading Engineer, AO 'TomskNIPIneft', 72, Tomsk, Mira Ave., 634027, Tomsk, Russia, GrigorevaYV@tomsknipi.ru

*Yuliya I. Ignatova*, Engineer, AO 'TomskNIPIneft', 72, Tomsk, Mira Ave., 634027, Tomsk, Russia, IgnatovaYI@tomsknipi.ru

*Aleksej G. Chugunov*, Chief Specialist, AO 'TomskNIPIneft', 72, Tomsk, Mira Ave., 634027, Tomsk, Russia, ChugunovAG@tomsknipi.ru

*Dmitrij S. Klimentev*, Head of Department, AO 'TomskNIPIneft', 72, Tomsk, Mira Ave., 634027, Tomsk, Russia, KlimentevDS@tomsknipi.ru

*Aleksandra P. Korolyova*, Software Engineer, AO 'TomskNIPIneft', 72, Tomsk, Mira Ave., 634027, Tomsk, Russia, KorolevaAP@tomsknipi.ru

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-180-191

*Д.Г. САМАРИН, В.Л. УСТЮЖАНИН, А.А. ЛОБАНОВ,  
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДЛИНЫ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ, ОСНОВАННЫМИ НА СХЕМЕ ДВУХ КАНАЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ**

Неразрушающий контроль строительных конструкций является эффективным способом проверки требуемых параметров. Одно из перспективных направлений – определение длины свай акустическими методами. Эти методы основаны на возбуждении и регистрации упругих волн на поверхности свай. Ограничением акустических методов является то, что скорость возбуждаемых упругих волн в теле свай предполагается заранее известной. Опыт исследований показывает, что на практике применение этого условия может приводить к значительной погрешности. Особенно это актуально для буронабивных свай, где скорость распространения упругих волн определяется множеством различных факторов. В рамках конкретного примера показана возможность повышения точности измерения скорости акустических волн в буронабивных сваях. Использование схемы двух каналов измерения, построенной на вводе установленного расстояния между приемными устройствами, позволило повысить точность измерения до 5 %.

**Ключевые слова:** акустические методы определения длины свай; буронабивные сваи; скорость распространения акустических волн в свае; поверхностный метод определения длины свай.

**Для цитирования:** Самарин Д.Г., Устюжанин В.Л., Лобанов А.А. Исследования по определению длины буронабивных свай акустическими методами, основанными на схеме двух каналов измерения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 4. С. 180–191.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-180-191

*D.G. SAMARIN, V.L. USTYUZHANIN, A.A. LOBANOV,  
Tomsk State University of Architecture and Building*

## **ACOUSTIC MEASUREMENTS OF BORED PILE LENGTH USING TWO CHANNELS**

Non-destructive testing of structures is an effective way to determine their required parameters. One of the promising directions is the acoustic measurement of the pile length using two channels. This method is based on the excitation and registration of elastic waves on the pile surface. A limitation of acoustic methods is that the speed of the elastic waves in the pile is assumed to be known in advance. Research results show that the practical application of this condition can lead to a significant error. This is especially true for bored piles, where the speed of the elastic wave propagation is determined by many different factors. This paper proposes to increase the measurement accuracy of the acoustic wave speed in the bored pile. The use of two measurement channels, which implies the introduction of the specified distance between the receiving devices, made it possible to increase the measurement accuracy up to 5 %.

**Keywords:** acoustic method; bored pile; acoustic wave speed; surface method; pile length.

**For citation:** Samarina D.G., Ustyuzhanin V.L., Lobanov A.A. Issledovaniya po opredeleniyu dliny buronabivnykh svai akusticheskimi metodami, osnovannymi na

skheme dvukh kanalov izmereniya [Acoustic measurements of bored pile length using two channels]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 4. Pp. 180–191. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-180-191

В практике строительства для решения задач по определению длины свай находят применение различные акустические методы (поверхностный метод, параллельный метод, метод, основанный на наблюдении в скважине «направляемых» волн) [1–14], которые основаны на анализе движения акустической волны и ее отражений в исследуемой свае. Данные методы соответствуют стандарту ASTM-D5882 [8].

Поверхностный метод является наиболее экономичным и обеспечивающим возможность проведения в короткие сроки значительного количества испытаний.

Принцип, на котором основан поверхностный метод, заключается в возбуждении и регистрации акустических волн на поверхности сваи (рис. 1, а). Возникающий вследствие механического воздействия на оголовок сваи ударный импульс приводит к созданию в свайном теле акустической волны. Волна распространяется вдоль ствола сваи и отражается от ее пяты (рис. 1, б). Отраженные волны возвращаются к верху сваи и регистрируются датчиком ускорения (акселерометром), установленным на оголовке сваи. Полученный сигнал интегрируется и представляется в виде сигнала скорости.

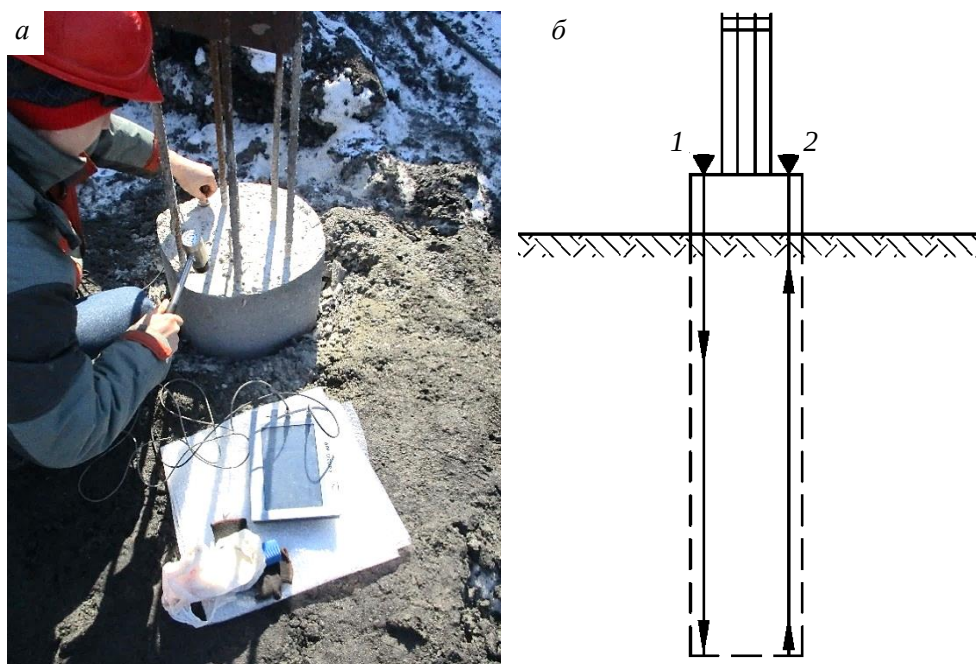


Рис. 1. Пример проведения исследований сваи поверхностным методом:

а – общий вид фрагмента исследований сваи; б – схема проведения исследований сваи: 1 – источник (место ударного воздействия на сваю); 2 – приемник (акселерометр)

Одним из основных ограничений поверхностного метода определения длины свай является то, что скорость в свае предполагается заранее известной. При соблюдении этого требования длина свай определяется по зависимости

$$L_{\text{св}} = \frac{V \cdot \Delta t}{2}, \quad (1)$$

где  $\Delta t$  – интервал времени между моментами механического воздействия на сваю и получением акселерометром сигнала от акустической волны, отраженной от пяты сваи, равен времени, необходимому для распространения волны по стволу сваи длиной, равной  $2L_{\text{св}}$ ;  $V$  – заданная скорость продольной волны в свае данного типа.

Скорость  $V$  определяется по следующей зависимости:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2)$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $\rho$  – плотность материала сваи.

Из приведенной зависимости (1) видно, что погрешность определения длины свай напрямую зависит от того, насколько точно задана скорость распространения волны в свае.

Опыт имеющихся исследований показывает, что для буронабивных свай непосредственное применение условия (2) может привести к значительной погрешности определения их длины. На скорость распространения акустических волн в буронабивных сваях влияет множество факторов (однородность строения материала тела сваи, возраст бетона, вид и количество крупного заполнителя в бетоне и т. д.).

Целью настоящей работы является оценка возможности повышения точности измерения скорости акустических волн в буронабивных сваях при использовании поверхностного метода определения длины свай.

Исследования свай проводились на площадке строительства комплекса сооружений обогатительной фабрики угля, расположенной в г. Киселевске Кемеровской области.

### **Инженерно-геологические условия строительной площадки**

По материалам проектных решений в геолого-литологическом строении площадка строительства представлена следующими инженерно-геологическими элементами (ИГЭ) (рис. 2):

ИГЭ 1а. Техногенный (насыпной) щебенисто-дресвяный грунт с суглинистым заполнителем до 30 %.

ИГЭ 1б. Техногенный (насыпной) суглинистый грунт, от полутвердой до мягкопластичной консистенции, с включением щебня, дресвы, строительного мусора до 15 %.

ИГЭ 3б. Суглинки озерно-болотные, голубовато-серого цвета, слабозаторфованные.

ИГЭ 4а. Суглинки аллювиальные, серо-коричневые, пылеватые мягкопластичной консистенции с примесью органического вещества.

ИГЭ 4б. Суглинки аллювиальные, серо-коричневые, пылеватые, мягкопластичной консистенции с примесью органического вещества.

ИГЭ 4г. Песок гравелистый (отложения р. Абы), серый, водонасыщенный.

ИГЭ 5. Коренные породы, представленные элювием аргиллита, алевролита, выветренного до состояния суглинка и глины с включением дресвы и щебня до 30 %.

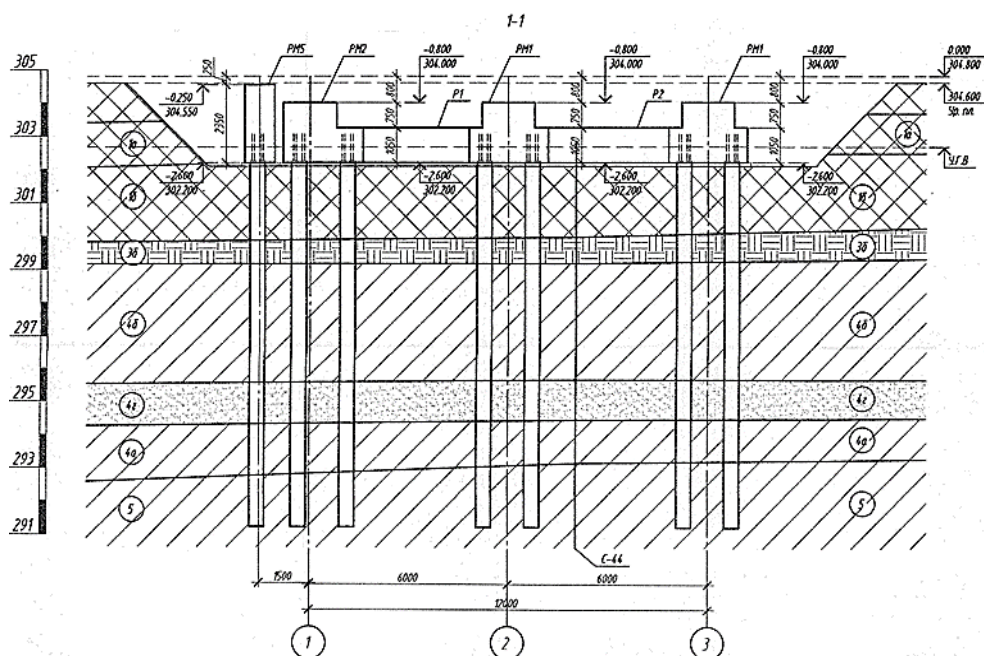


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез площадки строительства объекта с посадкой свайного основания

По гидрогеологическим условиям площадка относится к подтопляемой. При бурении скважин уровень грунтовых вод обнаружен на отметке 302.6.

В соответствии с проектом под комплекс сооружений предполагается устройство свайного основания (рис. 2).

Сваи запроектированы буронабивные железобетонные диаметром 450 мм. Для свай принят бетон прочности В25, морозостойкости F150, водонепроницаемости W8. Бетонирование железобетонных свай производится с применением добавки «Пенетрон-Адмикс» из расчета 4 кг добавки на 1 м<sup>3</sup>. Арматура класса АIII, марки 25Г2С.

Сваи по условиям взаимодействия с грунтом являются сваями-стойками. Основанием для свай является скальный грунт – алевролит средней прочности. Длина свай 11 м и выбрана из условия заглубления в грунт на 0,5–2,0 м.

### Методика проведения исследований свай

Для проведения исследований были изготовлены три опытные сваи с контролируемой длиной ( $L = 11$  м) (рис. 3). Буронабивные сваи устраивались по технологии непрерывного полого шнека (CFA), Ø450 мм.





Рис. 3. Подготовленные опытные сваи

Оценка возможности повышения точности измерения скорости акустических волн в свае, при использовании поверхностного метода определения длины свай, заключалась в применении способа, основанного на схеме двух каналов измерения (рис. 4).

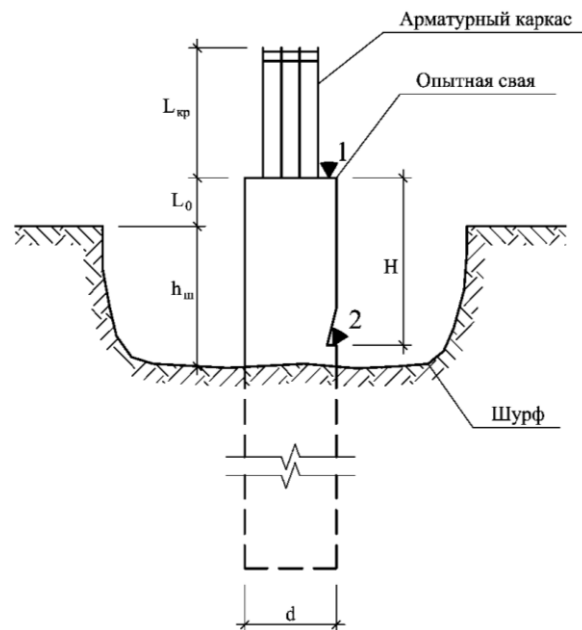


Рис. 4. Схема подготовки сваи к исследованиям по схеме двух каналов измерения:  
1, 2 – места расположения вибродатчиков;  $H$  – заданное расстояние между датчиками



В ходе испытаний свай были использованы: ударный инструмент, два вибродатчика и устройство для считывания сигналов. Первый вибродатчик, который может быть также совмещен с ударным инструментом (первый канал измерения), располагался на оголовке сваи, второй датчик устанавливался на заданном расстоянии по длине сваи (второй канал измерения) (рис. 4).

Для расположения датчиков на свае были подготовлены горизонтальные контактные площадки. Оси вибродатчиков и вектор распространения ударного импульса должны лежать максимально близко к одной прямой.

Схема двух каналов измерения работает следующим образом. Ударным инструментом осуществляется механическое воздействие на оголовки свай. Зафиксированные сигналы с вибродатчиков показывают время прохождения акустической волной заданного расстояния ( $H$ ). Тогда значение скорости можно рассчитать по следующей формуле:

$$V_{\text{уст}} = \frac{L_{\text{изв}}}{\Delta t}, \quad (3)$$

где  $L_{\text{изв}}$  – база измерений (заданное расстояние  $H$  между датчиками), м;  $\Delta t$  – разности по времени между двумя сигналами, с.

При использовании прибора «Спектр-3» скорость распространения акустической волны  $V_{\text{уст}}$  можно определить по формуле

$$V_{\text{уст}} = \frac{L_{\text{изв}}}{2L_{\text{уст}}} V_{\text{прин}}, \quad (4)$$

где  $V_{\text{прин}}$  – типовое значение скорости волны в свае данного типа, определяемое по формуле (2), м/с;  $L_{\text{изв}}$  – база измерений (заданное расстояние ( $H$ ) между датчиками), м;  $L_{\text{уст}}$  – расстояние между пиками сигналов датчиков, м.

Тогда длина сваи рассчитывается по формуле

$$L_{\text{св}} = V_{\text{уст}} \cdot \Delta t, \quad (5)$$

где  $V_{\text{уст}}$  – скорость распространения волны в свае, м/с;  $\Delta t$  – время прохождения волной заданного расстояния ( $L_{\text{изв}}$ ), с.

Результаты измерений скорости акустических волн и длины буронабивных свай приведены на рис. 5 и в табл. 1–7.

Таблица 1

Скорость распространения сигнала в свае № 1

| № удара                      | Типовая скорость волны в свае $V_{\text{прин}}$ , м/с | База измерений, м | Расстояние между пиками сигналов по прибору, м | Значение скорости волны в свае $V_{\text{опр}}$ , м/с |
|------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1                            | 3535                                                  | 0,95              | 0,57                                           | 2945,8                                                |
| 2                            | 3535                                                  | 0,95              | 0,6                                            | 2798,54                                               |
| 3                            | 3535                                                  | 0,95              | 0,59                                           | 2845,97                                               |
| 4                            | 3535                                                  | 0,95              | 0,55                                           | 3052,95                                               |
| 5                            | 3535                                                  | 0,95              | 0,62                                           | 2708,26                                               |
| 6                            | 3535                                                  | 0,95              | 0,64                                           | 2968,75                                               |
| Значение скорости в свае № 1 |                                                       |                   |                                                | 2889,77                                               |

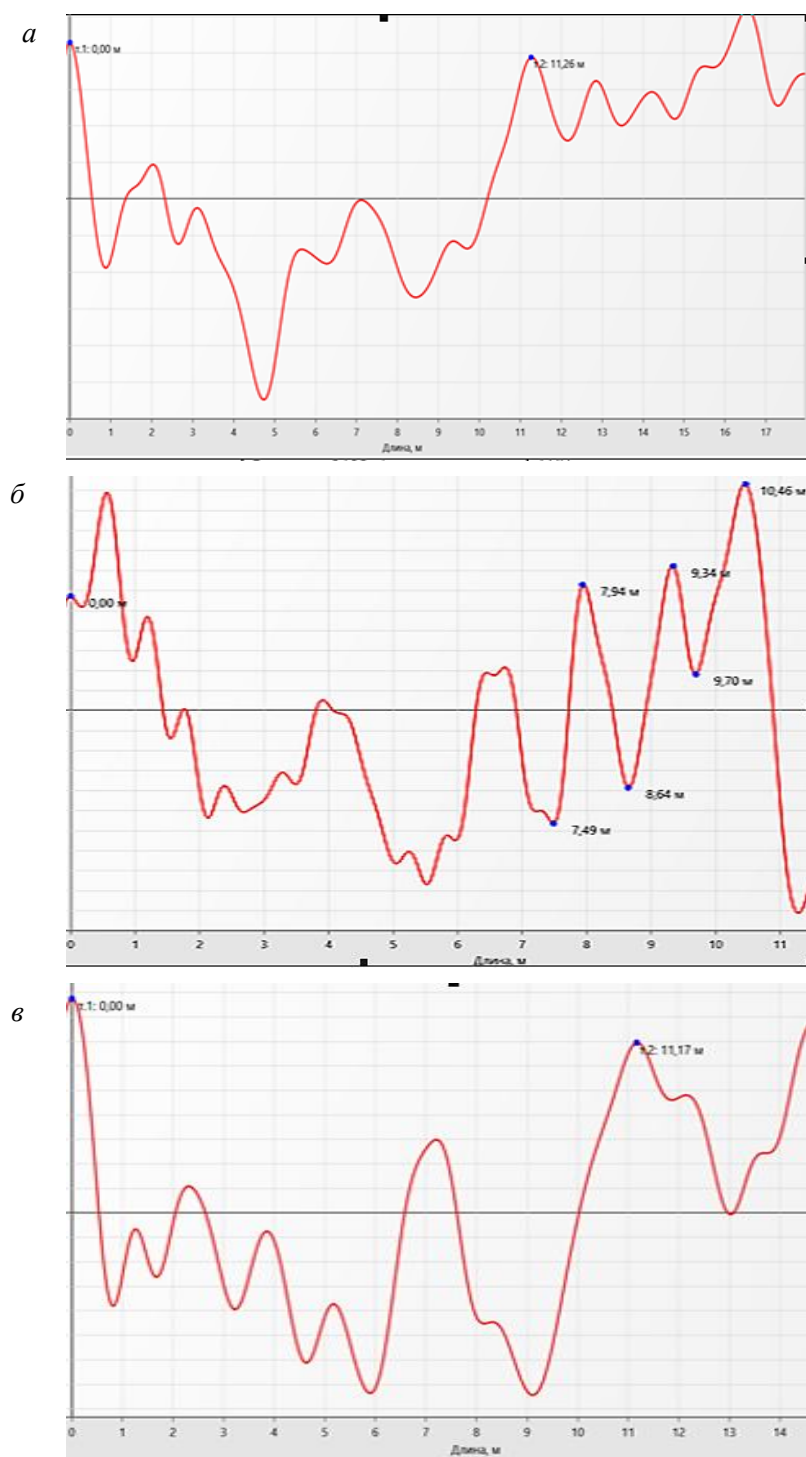


Рис. 5. Характерные графики отображения акустических волн с установленными частными значениями длины сваи:  
 а –  $L = 11,26$  м; б –  $L = 10,46$  м; в –  $L = 11,17$  м

Таблица 2

**Скорость распространения сигнала в свае № 2**

| № удара                      | Типовая скорость волны в свае $V_{\text{прин}}, \text{м/с}$ | База измерений, м | Расстояние между пиками сигналов по прибору, м | Значение скорости волны в свае $V_{\text{опр}}, \text{м/с}$ |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1                            | 3535                                                        | 0,91              | 0,5                                            | 3216,85                                                     |
| 2                            | 3535                                                        | 0,91              | 0,52                                           | 3093,12                                                     |
| 3                            | 3535                                                        | 0,91              | 0,56                                           | 2872,18                                                     |
| 4                            | 3535                                                        | 0,91              | 0,54                                           | 2978,56                                                     |
| 5                            | 3535                                                        | 0,91              | 0,51                                           | 3153,77                                                     |
| 6                            | 3535                                                        | 0,91              | 0,53                                           | 3034,76                                                     |
| Значение скорости в свае № 2 |                                                             |                   |                                                | 3065,05                                                     |

Таблица 3

**Скорость распространения сигнала в свае № 3**

| № удара                      | Типовая скорость волны в свае $V_{\text{прин}}, \text{м/с}$ | База измерений, м | Расстояние между пиками сигналов по прибору, м | Значение скорости волны в свае $V_{\text{опр}}, \text{м/с}$ |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1                            | 3535                                                        | 0,99              | 0,66                                           | 2651,25                                                     |
| 2                            | 3535                                                        | 0,99              | 0,63                                           | 2777,5                                                      |
| 3                            | 3535                                                        | 0,99              | 0,58                                           | 3016,9                                                      |
| 4                            | 3535                                                        | 0,99              | 0,61                                           | 2868,56                                                     |
| 5                            | 3535                                                        | 0,99              | 0,56                                           | 3124,68                                                     |
| 6                            | 3535                                                        | 0,99              | 0,58                                           | 3016,93                                                     |
| Значение скорости в свае № 3 |                                                             |                   |                                                | 2919,97                                                     |

Таблица 4

**Скорость распространения акустической волны в свае**

| № сваи | Скорость волны в свае, м/с | Установленное значение скорости акустической волны в свае $V_{\text{уст}}, \text{м/с}$ |
|--------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1      | 2889,77                    | 2958,26                                                                                |
| 2      | 3065,05                    |                                                                                        |
| 3      | 2919,97                    |                                                                                        |

Таблица 5

**Результаты определения длины сваи № 1**

| № | $\Delta t, \text{с}$ | $V_{\text{прин}}, \text{м/с}$ | $L_{\text{св}}, \text{м}$ | $V_{\text{опр}}, \text{м/с}$ | $L_{\text{св}}, \text{м}$ |
|---|----------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 1 | 0,0039               | 3535                          | 13,78                     | 2945,8                       | 11,7                      |
| 2 | 0,0042               | 3535                          | 14,8                      | 2798,54                      | 11,9                      |
| 3 | 0,0039               | 3535                          | 13,8                      | 2845,97                      | 11,6                      |

Окончание табл. 5

| №                          | $\Delta t$ , с | $V_{\text{прин}}$ , м/с | $L_{\text{св}}$ , м | $V_{\text{опр}}$ , м/с     | $L_{\text{св}}$ , м |
|----------------------------|----------------|-------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
| 4                          | 0,0038         | 3535                    | 13,4                | 3052,95                    | 11,9                |
| 5                          | 0,0037         | 3535                    | 13,07               | 2708,26                    | 10,1                |
| 6                          | 0,0035         | 3535                    | 12,37               | 2968,75                    | 10,3                |
| Длина свай $L_{\text{св}}$ |                |                         | 13,4 м              | Длина свай $L_{\text{св}}$ | 11,38 м             |

Таблица 6

## Результаты определения длины свай № 3

| №                          | $\Delta t$ , с | $V_{\text{прин}}$ , м/с | $L_{\text{св}}$ , м | $V_{\text{опр}}$ , м/с     | $L_{\text{св}}$ , м |
|----------------------------|----------------|-------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
| 1                          | 0,0038         | 3535                    | 13,4                | 2651,25                    | 10,2                |
| 2                          | 0,0037         | 3535                    | 13,07               | 2777,5                     | 10,5                |
| 3                          | 0,0039         | 3535                    | 13,8                | 3016,9                     | 11,9                |
| 4                          | 0,0041         | 3535                    | 14,5                | 2868,56                    | 11,8                |
| 5                          | 0,0038         | 3535                    | 13,43               | 3124,68                    | 12,1                |
| 6                          | 0,004          | 3535                    | 14,1                | 3016,93                    | 12,0                |
| Длина свай $L_{\text{св}}$ |                |                         | 13,7 м              | Длина свай $L_{\text{св}}$ | 11,57 м             |

Таблица 7

## Результаты определения длины свай № 2

| №                          | $\Delta t$ , с | $V_{\text{прин}}$ , м/с | $L_{\text{св}}$ , м | $V_{\text{опр}}$ , м/с     | $L_{\text{св}}$ , м |
|----------------------------|----------------|-------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
| 1                          | 0,0037         | 3535                    | 13,08               | 3216,85                    | 12,1                |
| 2                          | 0,0037         | 3535                    | 13,08               | 3093,12                    | 11,6                |
| 3                          | 0,0036         | 3535                    | 12,7                | 2872,18                    | 10,46               |
| 4                          | 0,0038         | 3535                    | 13,4                | 2978,56                    | 11,26               |
| 5                          | 0,0038         | 3535                    | 13,4                | 3153,77                    | 12,2                |
| 6                          | 0,0036         | 3535                    | 12,7                | 3034,76                    | 11,17               |
| Длина свай $L_{\text{св}}$ |                |                         | 13,2 м              | Длина свай $L_{\text{св}}$ | 11,53 м             |

Сопоставление значений скоростей акустических волн, полученных по формуле (2) и схеме двух каналов измерения, показывает, что в рассматриваемом случае их разница может достигать 20 %. Так скорость акустических волн по формуле (2) составила 3535 м/с, по схеме двух каналов измерения – 2958,6 м/с.

Установлено, что погрешность измерения длины свай, определяемая по формулам (1) и (2), может достигать 23 %. Так расчетная длина свай составляет  $L = 13,5$  м при фактической ее длине  $L = 11$  м.

Сопоставление фактической длины свай с результатами ее определения способом двухканального измерения показывает погрешность расхождения значений не более 5 %. При фактической длине свай  $L = 11$  м установленная длина свай составила  $L = 11,5$  м.

Таким образом, по результатам работы можно сделать следующее заключение:

– на конкретном примере показано, что применение способа определения скорости акустических волн, основанного на схеме двух каналов измерения, может значительно повысить точность определения длины буронабивных свай;

– поверхностный метод определения длины свай является наиболее экономичным и позволяет за короткие сроки провести большой объем испытаний свай. Однако данный метод предполагает, что скорость акустических волн в свае заранее известна. Для буронабивных свай, где скорость акустических волн зависит от многих факторов, это может привести к значительной погрешности. Например, в ходе исследований свай была установлена расчетная скорость акустической волны (формула (2))  $V = 3535$  м/с, а значение измеренной скорости составило  $V = 2958,26$  м/с;

– из зависимости (1) видно, что погрешность определения длины свай напрямую зависит от того, насколько точно задана скорость распространения акустической волны в теле сваи. Так результаты проведенных исследований показывают, что погрешность определения длины буронабивных свай по формулам (1) и (2) достигает 23 %. При расчетной скорости  $V = 3535$  м/с длина свай составила  $L = 13,5$  м при фактической ее длине  $L = 11,0$  м;

– установлено, что использование схемы двухканального измерения скорости акустических волн позволяет значительно повысить точность измерения длины буронабивных свай поверхностным методом. Сопоставление результатов исследований свай показало, что погрешность не превышает 5 %. Так при измерении длины свай рассматриваемый метод дает значение  $L = 11,5$  м при фактической длине свай  $L = 11$  м.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Капустин В.В. Применение волновых методов для определения длины свай // Технологии сейсморазведки. 2009. № 2. С. 113–117.
2. Капустин В.В. Методика изучения особенностей распространения акустических волн в бетонных сваях с использованием методов численного моделирования // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2008. № 3. С. 65–70.
3. Хмельницкий А.Ю., Владов М.Л., Капустин В.В. Экспериментальное исследование влияния вмещающего грунта на распространение акустических волн в свайных конструкциях // Инженерные изыскания. 2012. № 6. С. 16–23.
4. Капустин В.В. К вопросу о физических основах акустического метода испытания свай // Инженерные изыскания. 2011. № 11. С. 10–15.
5. Капустин В.В. Акустические методы контроля качества свайных фундаментных конструкций // Разведка и охрана недр. 2008. № 12. С. 1216.
6. Капустин В.В. Применение сейсмических и акустических технологий при исследовании состояния подземных строительных конструкций // Технологии сейсморазведки. 2008. № 1. С. 91–99.
7. Алешин Д.Н., Котова Н.В., Алешина Е.А. Комплекс методов неразрушающего контроля для обследования фундаментов зданий // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2014. № 4 (10). С. 40–42.
8. ASTM D5882–16. Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations.
9. Carino N.J. The Impact-Echo Method: An Overview. Building and Fire Research Laboratory. National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899-8611 USA, 2001.

10. Davis A.G. Nondestructive Testing of Wood Piles // Proceeding, Second International Conference on Wood Poles and Piles. 1994, March 21–23; Fort Collins, CO.
11. Xiping Wang, Ross R.J. Nondestructive Evaluation of Standing Trees with a Stress Wave Method // J. Wood and Fiber Science. 2001. 33 (4). P. 522–533.
12. Schubert F., Kohler B., Pfeiffer A. Time Domain Modeling of Axisymmetric Wave Propagation in Isotropic Elastic Media with CEFIT – Cylindrical Elastodynamic Finite Integration Technique // Journal of Computational Acoustics. 2001. V. 9. № 3. P. 1127–1146.
13. Niederleithinger E., Taffe A., Fechner, T. Improved Parallel Seismic Technique for Foundation Assessment // SAGEEP. 2005. Extended Abstracts: Atlanta, USA.
14. Niederleithinger E. Numerical simulation of low strain dynamic pile tests. Proceedings of Stresswave : Lisbon, 2008.

## REFERENCES

1. Kapustin V.V. Primenenie volnovykh metodov dlya opredeleniya dliny svaj [Wave methods in determining pile lengths]. *Tekhnologii seismorazvedki*. 2009. No. 2. Pp. 113–117. (rus)
2. Kapustin V.V. Metodika izucheniya osobennostej rasprostraneniya akusticheskikh voln v betonnykh svayah s ispol'zovaniem metodov chislennogo modelirovaniya [Methodology for studying acoustic wave propagation in concrete piles using numerical simulation methods]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 4. Geologiya*. 2008. No. 3. Pp. 65–70. (rus)
3. Hmel'nickij A.Yu., Vladov M.L., Kapustin V.V. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya vmeshchayushchego grunta na rasprostranenie akusticheskikh voln v svajnykh konstrukciyakh [Host soil influence on acoustic wave propagation in pile structures]. *Inzhenernye izyskaniya*. 2012. No. 6. Pp. 16–23. (rus)
4. Kapustin V.V. K voprosu o fizicheskikh osnovakh akusticheskogo metoda ispytaniya svaj [Physical foundations of the acoustic pile test method]. *Inzhenernye izyskaniya*. 2011. No. 11. Pp. 10–15. (rus)
5. Kapustin V.V. Akusticheskie metody kontrolya kachestva svajnykh fundamentnykh konstrukcij [Acoustic methods of quality control of pile foundation structures]. *Razvedka i ohrana neдр*. 2008. No. 12. P. 1216. (rus)
6. Kapustin V.V. Primenenie seismicheskikh i akusticheskikh tekhnologij pri issledovanii sostoyaniya podzemnykh stroitel'nykh konstrukcij [Application of seismic and acoustic technologies in underground building structures]. *Tekhnologii seismorazvedki*. 2008. No. 1. Pp. 91–99. (rus)
7. Aleshin D.N., Kotova N.V., Aleshina E.A. Kompleks metodov nerazrushayushchego kontrolya dlya obsledovaniya fundamentov zdaniy [Non-destructive testing methods for inspection of building foundations]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2014. No. 4 (10). Pp. 40–42. (rus)
8. ASTM D5882 – 16 Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations.
9. Carino N.J. The impact-echo method: An overview. Building and Fire Research Laboratory. National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899-8611, USA, 2001.
10. Davis A.G. Nondestructive testing of wood piles. *Proc. 2nd Int. Conf. on Wood Poles and Piles*. 1994. March 21–23. Fort Collins, CO.
11. Xiping Wang, Ross R.J. Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method. *Wood and Fiber Science*. 2001. V. 33. No. 4. Pp. 522–533.
12. Schubert F., Kohler B., Pfeiffer A. Time domain modeling of axisymmetric wave propagation in isotropic elastic media with CEFIT – Cylindrical Elastodynamic Finite Integration Technique. *Journal of Computational Acoustics*. 2001. V. 9. No. 3. Pp. 1127–1146.
13. Niederleithinger E., Taffe A., Fechner, T. Improved parallel seismic technique for foundation assessment. Extended abstracts of Annual Meeting “The Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems”. Atlanta, USA, 2005.
14. Niederleithinger E. Numerical simulation of low strain dynamic pile tests. Proceedings of Stresswave. Lisbon, 2008

**Сведения об авторах**

*Самарин Дмитрий Геннадьевич*, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sdgsamara@mail.ru

*Устюжанин Владимир Леонидович*, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tgasu9k@mail.ru

*Лобанов Александр Александрович*, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, oflaa2010@mail.ru

**Authors Details**

*Dmitry G. Samarin*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, sdgsamara@mail.ru

*Vladimir L. Ustyuzhanin*, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, tgasu9k@mail.ru

*Aleksandr A. Lobanov*, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, oflaa2010@mail.ru

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

УДК 625.731.8 – 027.45

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-192-200

Р.П. МОИСЕЕНКО, Г.В. ПУШКАРЁВА, И.З. КУЦИЯ,

*Томский государственный архитектурно-строительный университет*

## НАДЁЖНОСТЬ НЕЖЁСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД ПО МОРОЗОУСТОЙЧИВОСТИ

В статье показано, что используемый в ОДН 218.046-01 и ПНСТ 265-2018 алгоритм расчёта нежёстких дорожных одежд на морозоустойчивость содержит ошибку. Анализ проведён на уровне теории вероятностей. Методом моментов решена задача надёжности дорожных одежд по критерию морозоустойчивости. Общий метод расчёта позволяет оценить частные варианты. Доказано, что алгоритм из ОДН и ПНСТ даёт результат с вероятностью  $P = 0,5$ . Такая вероятность не может быть приемлемой. Альтернативный вариант алгоритма представлен в виде полученного уравнения заданной надёжности по морозоустойчивости. Из этого уравнения при допускаемой величине пучения и заданной вероятности  $P = 0,95$  определяется расчётная величина пучения, которая всегда меньше допускаемой величины. Известная величина пучения позволяет определить толщину морозозащитного слоя. Эта толщина значительно больше, чем толщина, определённая по алгоритму в ОДН и ПНСТ. Формально получается перерасход материала, но сравнение производится с вариантом, содержащим ошибку ( $P = 0,5$ ). Следовательно, такое сравнение не может быть корректным. Рекомендовано заменить в действующих нормативных документах ОДН и ПНСТ существующий алгоритм на алгоритм, разработанный в данной статье.

**Ключевые слова:** заданная надёжность; морозоустойчивость; дорожная одежда; морозозащитный слой; пучение грунта.

**Для цитирования:** Моисеенко Р.П., Пушкарёва Г.В., Куция И.З. Надёжность нежёстких дорожных одежд по морозоустойчивости // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 4. С. 192–200.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-192-200

R.P. MOISEENKO, G.V. PUSHKARYOVA, I.Z. KUCYIA,

*Tomsk State University of Architecture and Building*

## FROST RESISTANCE OF FLEXIBLE PAVEMENTS

The article shows that the algorithm used in the road design standard and national prestandard for calculating the frost resistance of flexible pavements has errors. The analysis is carried



in terms of the probability theory. Using the moments method, the problem of frost resistance of flexible pavements is solved. The general calculation allows evaluating particular options. It is proven that the algorithm proposed by the road design standard gives a result with a 0.5 probability, which cannot be acceptable. The proposed algorithm is presented in the form of equation of the frost resistance. From this equation, with an allowable value of heaving and 0.95 probability, the soil heaving is determined, which is always less than the allowable value. The known soil heaving allows to determine the thickness of the anti-frost heavy course, which is much greater than the thickness determined by algorithms proposed by the road design standard and national prestandard. Technically, the material is overspent, but the comparison is made with the error-containing algorithm. Therefore, this comparison cannot be correct. It is recommended to replace algorithms proposed by the road design standard and national prestandard with the algorithm proposed in this article.

**Keywords:** set reliability; frost resistance; pavement; anti-frost heavy course; soil heaving.

**For citation:** Moiseenko R.P., Pushkaryova G.V., Kucyia I.Z. Nadezhnost' nezhestkikh dorozhnykh odezhd po morozoustoichivosti [Frost resistance of flexible pavements]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 4. Pp. 192–200. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-192-200

### Введение

В статье [1] отмечается несоответствие в трактовке термина «надёжность» между специалистами по теории расчёта дорожных одежд и специалистами по математической теории надёжности. Вкратце эта разница состоит в следующем.

В современной литературе (например, [2]) и нормативных документах по расчёту дорожных одежд [11, 12] используется термин «заданная надёжность» при назначении величины коэффициента запаса прочности или жёсткости. Требуемый коэффициент прочности или жёсткости выбирается по таблице в зависимости от коэффициента заданной надёжности ( $K_H$ ). Такое использование термина «надёжность» не согласуется с математической теорией надёжности [3, 4]. В теории надёжности разработаны алгоритмы расчёта объектов методами теории вероятностей с определением вероятности случайного события. Для дорожных одежд случайным событием является выполнение условий прочности, жёсткости или морозоустойчивости. Показателем надёжности является вероятность выполнения условия. Вероятность по алгоритмам теории вероятностей зависит от средних значений и среднеквадратичных отклонений случайных величин.

В статье применение методов теории вероятностей показано на примере расчёта надёжности нежесткой дорожной одежды по критерию морозоустойчивости.

### Постановка задачи

Условие морозоустойчивости нежесткой дорожной одежды имеет вид [2, 11, 12]

$$l_{\text{пуч}} \leq l_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где  $l_{\text{пуч}}$  – расчётное пучение грунта земляного полотна;  $l_{\text{доп}}$  – допускаемое пучение грунта.

При корректной постановке задачи в рамках математической теории надёжности должна определяться вероятность выполнения условия (1). Последовательность решения этой задачи методом моментов [5, 6] состоит в следующем.

1. Условие морозоустойчивости переписывается в виде [7]

$$g = l_{\text{доп}} - l_{\text{пуч}} \geq 0, \quad (2)$$

где  $g$  – резерв морозоустойчивости.

2. Расчётное пучение грунта определяется по формуле [2, 11, 12]

$$l_{\text{пуч}} = l_{\text{пуч.ср}} K_{\text{угв}} K_{\text{пл}} K_{\text{гр}} K_{\text{нагр}} K_{\text{вл}}, \quad (3)$$

где  $l_{\text{пуч.ср}}$  – величина пучения при осреднённых условиях;  $K_{\text{угв}}$  – коэффициент, учитывающий влияние уровня грунтовых вод;  $K_{\text{пл}}$  – коэффициент, учитывающий влияние плотности грунта рабочего слоя;  $K_{\text{гр}}$  – коэффициент, учитывающий влияние гранулометрического состава грунта основания;  $K_{\text{нагр}}$  – коэффициент, учитывающий влияние нагрузки от собственного веса слоёв дорожной одежды;  $K_{\text{вл}}$  – коэффициент, учитывающий влияние влажности грунта.

3. Все коэффициенты и величина пучения при осреднённых условиях определяются по соответствующим таблицам и графикам. Это значит, что аналитическую зависимость между резервом морозоустойчивости ( $g$ ) и случайными характеристиками основания и дорожной одежды установить невозможно. Тогда остаётся один вариант – принять в качестве случайных только две величины:  $l_{\text{пуч}}$  и  $l_{\text{доп}}$ . Для этих величин назначаются вероятностные характеристики:  $\bar{l}_{\text{пуч}}$  – среднее значение расчётного пучения;  $\bar{l}_{\text{доп}}$  – среднее значение допускаемого пучения грунта;  $S(l_{\text{пуч}})$  – среднеквадратичное отклонение величины  $l_{\text{пуч}}$ ;  $S(l_{\text{доп}})$  – среднеквадратичное отклонение величины  $l_{\text{доп}}$ .

4. Определяется дисперсия резерва морозоустойчивости [8]:

$$S_g^2 = S^2(l_{\text{доп}}) + S^2(l_{\text{пуч}}). \quad (4)$$

5. Определяется среднеквадратичное отклонение резерва морозоустойчивости:

$$S_g = \sqrt{S_g^2}. \quad (5)$$

6. Определяется индекс надёжности:

$$\beta = \frac{g}{S_g}. \quad (6)$$

7. Определяется вероятность выполнения условия морозоустойчивости (1):

$$P(g \geq 0) = 0,5 + \Phi(\beta), \quad (7)$$

где  $\Phi(\beta)$  – интеграл Лапласа, определяемый по соответствующей таблице.

Таким образом, известный алгоритм метода моментов из теории вероятностей использован для расчёта надёжности морозоустойчивости нежёстких

дорожных одежд. Ниже приводится характеристика существующего алгоритма расчёта морозозащитного слоя в сравнении с представленным алгоритмом расчёта надёжности морозоустойчивости дорожных одежд.

### Расчёт морозозащитного слоя

Наиболее полно алгоритм расчёта морозозащитного слоя представлен в ОДН 218.046-01. Если условие морозоустойчивости (1) не выполняется, то производится расчёт морозозащитного слоя. В качестве исходной предпосылки расчёта принимается формула для вычисления  $l_{\text{Пуч.СР}}$ . Из формулы (3) следует

$$l_{\text{Пуч.СР}} = l_{\text{Пуч}} / (K_{\text{УТВ}} K_{\text{ПЛ}} K_{\text{ГР}} K_{\text{НАГР}} K_{\text{ВЛ}}). \quad (8)$$

Чтобы использовать формулу (8), необходимо задаться величиной  $l_{\text{Пуч}}$ . В ОДН и во всех учебниках принято:

$$l_{\text{Пуч}} = l_{\text{ДОП}}. \quad (9)$$

Тогда формула (8) преобразуется к виду

$$l_{\text{Пуч.СР}} = l_{\text{ДОП}} / (K_{\text{УТВ}} K_{\text{ПЛ}} K_{\text{ГР}} K_{\text{НАГР}} K_{\text{ВЛ}}). \quad (10)$$

Далее по величине  $l_{\text{Пуч.СР}}$  определяются параметры морозозащитного слоя. Однако условие (9) приводит к следующему результату в расчёте надёжности:

$$l_{\text{Пуч}} = l_{\text{ДОП}} \Rightarrow g = l_{\text{ДОП}} - l_{\text{Пуч}} = 0 \Rightarrow \beta = \frac{g}{S_g} = \frac{0}{S_g} = 0 \Rightarrow$$

$$P(g \geq 0) = 0,5 + \Phi(\beta) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P(g \geq 0) = 0,5 + \Phi(0) \Rightarrow P(g \geq 0) = 0,5 + 0 = 0,5.$$

Полученный результат показывает, что условие (9) позволяет выполнить условие морозоустойчивости (1), но этот предельный вариант приводит к очень низкой величине вероятности выполнения условия (1) –  $P = 0,5$ . Таким образом, существующая методика расчёта морозозащитного слоя является неприемлемой с точки зрения обеспечения высокого уровня надёжности. Этот вывод показывает, что заданную надёжность можно обеспечить только на основе прямого использования алгоритма метода моментов.

### Расчёт морозоустойчивости нежесткой дорожной одежды при заданной надёжности

Заданная надёжность обеспечивается не заданием коэффициента надёжности, а использованием формул метода моментов. Пусть  $[P]$  – заданная вероятность. Тогда из формулы (7) следует

$$P(g \geq 0) = 0,5 + \Phi(\beta) \Rightarrow [P] = 0,5 + \Phi(\beta) \Rightarrow \Phi(\beta) = [P] - 0,5.$$

По таблице интегралов Лапласа при известной величине интеграла определяется заданное значение индекса надёжности  $[\beta]$ . Из формулы (6) следует

$$\beta = \frac{g}{S_g} \Rightarrow [\beta] = \frac{g}{S_g} \Rightarrow [\beta]^2 = \frac{g^2}{S_g^2} \Rightarrow g^2 - S_g^2 [\beta]^2 = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (l_{\text{доп}} - l_{\text{пуч}})^2 - [\beta]^2 [S^2(l_{\text{доп}}) + S^2(l_{\text{пуч}})] = 0. \quad (11)$$

Уравнение (11) является уравнением заданной надёжности морозозащитного слоя. Из этого уравнения определяется величина  $l_{\text{пуч}}$ . Чем больше будет величина  $[P]$ , тем больше будет величина  $\beta$ . Увеличение  $\beta$  при постоянной величине  $l_{\text{доп}}$  вызывает уменьшение  $l_{\text{пуч}}$ . Качественная зависимость по уравнению (11) получается следующей: при увеличении заданной вероятности выполнения условия морозоустойчивости уменьшается расчётное пучение грунта.

При известной величине  $l_{\text{пуч}}$  по формуле (8) определяется  $l_{\text{пуч.ср}}$  – величина пучения при осреднённых условиях. Затем по соответствующей номограмме определяется толщина дорожной одежды  $h_{\text{од}}$ . Номограмма показывает, что с уменьшением величины пучения толщина дорожной одежды увеличивается, т. е. для увеличения надёжности приходится увеличивать расход материала. Этой естественной закономерности соответствует уравнение заданной надёжности (11).

Использование уравнения (11) показано на примерах из ОДН 218.046-01.

**Пример 1.** Исходные данные:

- дорога располагается во II дорожно-климатической зоне, в Московской области;
- категория автомобильной дороги – I;
- заданный срок службы дорожной одежды –  $T_{\text{сл}} = 20$  лет;
- заданная надёжность –  $K_{\text{н}} = 0,95$ ;
- грунт рабочего слоя земляного полотна – супесь пылеватая с расчётной влажностью  $0,7W_T$ , отнесён к сильнопучинистым грунтам;
- материал для основания – щебёночно-гравийно-песчаная смесь, обработанная цементом марки 20;
- высота насыпи – 1,5 м, толщина дорожной одежды – 0,6 м;
- схема увлажнения рабочего слоя земляного полотна – III;
- глубина залегания грунтовых вод – 1,1 м.

*Расчёт морозоустойчивости по существующей методике*

1. Глубина промерзания дорожной конструкции:

$$Z_{\text{пр}} = Z_{\text{пр(ср)}} \cdot 1,38 = 1,4 \cdot 1,38 = 1,93 \approx 2 \text{ м.}$$

2. По глубине промерзания при толщине дорожной одежды 0,6 м определяется величина морозного пучения для осреднённых условий:  $l_{\text{пуч.ср}} = 8,5$  см. Коэффициенты равны:  $K_{\text{УГВ}} = 0,61$ ;  $K_{\text{пл}} = 1,2$ ;  $K_{\text{гр}} = 1,1$ ;  $K_{\text{нагр}} = 0,92$ ;  $K_{\text{вл}} = 1,1$ . Величина пучения по формуле (3) –  $l_{\text{пуч}} = 6,9$  см. Величина допускаемого пучения –  $l_{\text{доп}} = 4$  см. Условие морозоустойчивости (1) не выполняется.

3. Расчёт морозозащитного слоя. Величина  $l_{\text{пуч.ср}}$  определяется по формуле (10) –  $l_{\text{пуч.ср}} = 4,9$  см. По номограмме определяется требуемая толщина дорожной одежды –  $h_{\text{од}} = 0,92$  м. Толщина морозозащитного слоя –

$h_{\text{МРЗ}} = h_{\text{ОД}} - h_{\text{ОД}}^0 = 0,92 - 0,6 = 0,32$  м. В разделе статьи «Расчёт морозозащитного слоя» показано, что надёжность этого морозозащитного слоя обеспечена с вероятностью  $P = 0,5$ , несмотря на то, что в исходных данных принято  $K_{\text{Н}} = 0,95$ . Для увеличения надёжности необходимо использовать уравнение (11).

*Расчёт морозоустойчивости методом моментов  
при заданной надёжности*

Пусть  $[P] = 0,95$ , т. е. принято  $[P] = K_{\text{Н}}$ . Тогда интеграл Лапласа равен  $\Phi(\beta) = [P] - 0,5 = 0,95 - 0,5 = 0,45$ . По таблице интегралов Лапласа определяется индекс надёжности  $\beta = 1,65$ .

Уравнение (11) необходимо преобразовать, выразив среднеквадратичные отклонения  $S$  через средние значения величин  $l$  с помощью коэффициентов вариации  $C$  [10]:

$$S(l_{\text{Пуч}}) = C_{\text{Пуч}} \cdot \bar{l}_{\text{Пуч}}; \quad S(l_{\text{Доп}}) = C_{\text{Доп}} \cdot \bar{l}_{\text{Доп}}.$$

Кроме этого, потребуются формулы

$$l_{\text{Пуч}} = \bar{l}_{\text{Пуч}} / (1 - C_{\text{Пуч}}); \quad l_{\text{Доп}} = \bar{l}_{\text{Доп}} / (1 + C_{\text{Доп}}). \quad (12)$$

Подстановка этих выражений в уравнение (11) даёт следующий результат:

$$\begin{aligned} \bar{l}_{\text{Пуч}}^2 \left( \frac{1}{(1 - C_{\text{Пуч}})^2} - \beta^2 \cdot C_{\text{Пуч}}^2 \right) - \frac{2l_{\text{Доп}} \cdot \bar{l}_{\text{Пуч}}}{(1 - C_{\text{Пуч}})} + \\ + \bar{l}_{\text{Доп}}^2 \left( 1 - \beta^2 \cdot C_{\text{Доп}}^2 (1 + C_{\text{Доп}})^2 \right) = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Чтобы использовать уравнение (13), надо принять значения коэффициентов вариации. Для материалов автомобильных дорог отклонение характеристик от средних значений обычно принимается в пределах 20 % [8]. Тогда пусть  $C_{\text{Пуч}} = 0,2$ ;  $C_{\text{Доп}} = 0,2$ . С учётом этих значений коэффициентов вариации, величин  $\beta = 1,65$  и  $l_{\text{Доп}} = 4$  см уравнение (13) преобразуется к квадратному уравнению относительно  $\bar{l}_{\text{Пуч}}$ :

$$1,4536 \bar{l}_{\text{Пуч}}^2 - 10 \bar{l}_{\text{Пуч}} + 13,491 = 0.$$

Меньший корень этого уравнения равен  $\bar{l}_{\text{Пуч}} = 1,842$  (при большем корне не выполняется условие морозоустойчивости). Расчётное значение  $l_{\text{Пуч}}$  определяется по формуле (12):

$$l_{\text{Пуч}} = \bar{l}_{\text{Пуч}} / (1 - C_{\text{Пуч}}) = 1,842 / (1 - 0,2) = 2,3.$$

Далее величина  $l_{\text{Пуч.СР}}$  определяется по формуле (9):

$$l_{\text{Пуч.СР}} = l_{\text{Пуч}} / (K_{\text{УГВ}} K_{\text{ПЛ}} K_{\text{ГР}} K_{\text{НАГР}} K_{\text{ВЛ}}) = 2,3 / (0,61 \cdot 1,2 \cdot 1,1 \cdot 0,92 \cdot 1,1) = 1,874 \text{ см.}$$

По соответствующей номограмме при  $l_{\text{Пуч,ср}} = 1,874$  см определяется толщина дорожной одежды –  $h_{\text{Од}} = 1,45$  м. Толщина морозозащитного слоя –  $h_{\text{МРЗ}} = h_{\text{Од}} - h_{\text{Од}}^0 = 1,45 - 0,6 = 0,85$  м.

Таким образом, по алгоритму ОДН  $h_{\text{МРЗ}} = 0,32$  м, по вновь разработанному алгоритму с заданной надёжностью  $h_{\text{МРЗ}} = 0,85$  м. Расход материала увеличился в 2,65 раза.

Расчёт показал, что достижение вероятности безотказной работы с уровня  $P = 0,5$  до  $P = 0,95$  требует большого расхода материала. Алгоритм расчёта морозозащитного слоя, представленный в ОДН 218.046-01, является слишком приближительным.

**Пример 2.** Рассматривается пример № 5 из ОДН 218.046-01. По глубине промерзания 2 м и при толщине дорожной одежды 0,7 м определяется величина морозного пучения для осреднённых условий:  $l_{\text{Пуч,ср}} = 7$  см. Коэффициенты равны:  $K_{\text{УГВ}} = 0,67$ ;  $K_{\text{Пл}} = 1,2$ ;  $K_{\text{ГР}} = 1,1$ ;  $K_{\text{НАГР}} = 0,92$ ;  $K_{\text{ВЛ}} = 1,1$ . Величина пучения по формуле (3) –  $l_{\text{Пуч}} = 6,26$  см. Величина допускаемого пучения –  $l_{\text{Доп}} = 4$  см. Условие морозоустойчивости (1) не выполняется.

Расчёт морозозащитного слоя. Величина  $l_{\text{Пуч,ср}}$  определяется по формуле (10) –  $l_{\text{Пуч,ср}} = 4,47$  см. По номограмме определяется требуемая толщина дорожной одежды –  $h_{\text{Од}} = 1,05$  м. Толщина морозозащитного слоя –  $h_{\text{МРЗ}} = h_{\text{Од}} - h_{\text{Од}}^0 = 1,05 - 0,7 = 0,35$  м. Расчёт по уточнённой методике с учётом теплофизических характеристик дал результат:  $h_{\text{МРЗ}} = 0,5$ .

Расчёт по алгоритму с заданной надёжностью  $P = 0,95$  имеет те же результаты:  $l_{\text{Пуч}} = 2,3$ ;  $h_{\text{МРЗ}} = 0,85$  м. Расход материала увеличился в  $0,85/0,35 = 2,43$  раза. По сравнению с уточнённым расчётом увеличение расхода материала составляет  $0,85/0,5 = 1,7$  раза.

### Выводы

1. Предложен алгоритм расчёта надёжности нежёстких дорожных одежд по критерию морозоустойчивости. Алгоритм основан на применении метода моментов теории вероятностей при нормальном распределении плотности вероятностей случайных величин.

2. Аналитическими расчётами показано, что представленный нормами алгоритм расчёта морозоустойчивости нежёстких дорожных одежд обеспечивает недостаточную вероятность её безотказной работы –  $P = 0,5$ . Расчёты учитывают нормальное распределение плотности вероятностей, но нормальное распределение является предельным для всех функций распределения.

3. Рассмотренный алгоритм расчёта морозоустойчивости нежёсткой дорожной одежды при заданном уровне надёжности может привести к значительному расходу материала на устройство морозозащитного слоя, но это увеличение реально обеспечит безотказную работу дорожной одежды в период между её капитальными ремонтами.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моисеенко Р.П., Пушкарёва Г.В., Акимов Б.Г., Стешенко А.О. Расчёт надёжности нежестких дорожных одежд методом моментов по критерию допускаемого прогиба // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 6. С. 220–226.
2. Афиногенов О.П., Ефименко В.Н., Ефименко С.В. Конструирование и расчёт дорожных одежд. Кемерово : Кузбассвуиздат, 2008. 371 с.
3. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надёжности. Москва : Советское радио, 1969. 488 с.
4. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надёжности. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2006. 704 с.
5. Райзер В.Д. Теория надёжности сооружений. Москва : Изд-во АСВ, 2010. 384 с.
6. Su K., Sun L., Hachiya Y., Maekawa R. Analysis of Shear Stress in Asphalt Pavements Under Actual Measured Tire-Pavement Contact Pressure // Proceedings of the 6th ICPT. Japan, 2008. P. 11–18.
7. Ржаницын А.Р. Строительная механика. Москва : Высшая школа, 1982. 400 с.
8. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики. Москва : Наука, 1965. 511 с.
9. Takemi Inoue, Yasuo Gunji, Hirokazu Akagi. Rational design method of hot mix asphalt based on calculated VMA // Euraspalt & Eurobitume Congress. Vienna, 2004.
10. Золотарь И.А., Некрасов В.К., Коновалов С.В., Яковлев Ю.М., Коганзон М.С. Повышение надёжности автомобильных дорог. Москва : Транспорт, 1977. 183 с.
11. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд / Министерство транспорта РФ. Москва : Транспорт, 2001. 145 с.
12. ПНСТ 265-2018. Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование нежестких дорожных одежд. Москва : Стандартинформ, 2018. 77 с.

## REFERENCES

1. Moiseenko R.P., Pushkaryova G.V., Akimov B.G., Steshenko A.O. Raschet nadezhnosti nezhestkikh dorozhnykh odezhd metodom momentov po kriteriyu dopuskaemogo progibaz [Reliability analysis of flexible pavements using moments method and bending strain criterion]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. No. 6. Pp. 220–226. (rus)
2. Afingegenov O.P., Efimenko V.N., Efimenko S.V. Konstruirovaniye i raschet dorozhnykh odezhd [Pavement design and strength analysis]. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2008. 371 p. (rus)
3. Barlow R., Proschan F. Matematicheskaya teoriya nadezhnosti [Mathematical theory of reliability]. Moscow: Sovetskoe radio, 1969. 488 p. (transl. from Engl.)
4. Polovko A.M., Gurov S.V. Osnovy teorii nadezhnosti [Fundamentals of reliability theory]. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2006. 704 p. (rus)
5. Raizer V.D. Teoriya nadezhnosti sooruzhenii [Theory of reliability of structures]. Moscow: ASV. 2010. 384 p. (rus)
6. Su K., Sun L., Hachiya Y., Maekawa R. Analysis of shear stress in asphalt pavements under actual measured tire-pavement contact pressure. *Proc. 6th Int. Conf. on Physics and Theory*. Japan, 2008. Pp. 11–18.
7. Rzhantsyn A.R. Stroitel'naya mekhanika [Structural mechanics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1982. 400 p. (rus)
8. Smirnov N.V., Dunin-Barkovskii I.V. Kurs teorii veroyatnostei i matematicheskoi statistiki [The course on probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Nauka, 1965. 511 p. (rus)
9. Takemi Inoue, Yasuo Gunji, Hirokazu Akagi. Rational design method of hot mix asphalt based on calculated. *VMA Euraspalt & Eurobitume Congress*. Vienna, 2004.
10. Zolotar' I.A., Nekrasov V.K., Konovalov S.V., Yakovlev Yu.M., Koganzon M.S. Povysheniye nadezhnosti avtomobil'nykh dorog [Improvement of road reliability]. Moscow: Transport, 1977. 183 p. (rus)
11. Road Design Standard 218. 046-01 Proektirovaniye nezhestkikh dorozhnykh odezhd [Design of flexible pavements]. Moscow: Transport, 2001. 145 p. (rus)

12. National Prestandard 265 – 2018 Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Proektirovanie nezhestkikh dorozhnykh odezhd [Automobile public roads. Design technique for flexible pavements]. Moscow: Standartinform, 2018. 77 p. (rus)

#### **Сведения об авторах**

*Моисеенко Ростислав Павлович*, докт. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, moiseenko-rostislav@mail.ru

*Пушкарёва Галина Вениаминовна*, канд. физ.-мат. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kedrik42@mail.ru

*Куция Илья Зурабович*, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, buzzzzzy@mail.ru

#### **Authors Details**

*Rostislav P. Moiseenko*, DSc, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, moiseenkorostislav@mail.ru

*Galina V. Pushkaryova*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kedrik42@mail.ru

*Ilia Z. Kucyia*, Undergraduate, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, buzzzzzy@mail.ru