

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный
архитектурно-строительный университет

ВЕСТНИК

ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Tom 23

№ 2 2021
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; гл. редактор; lls@tsuab.ru; г. Томск
Акимов П.А., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, главный ученый секретарь РААСН; 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; г. Москва
Бондаренко И.А., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, директор НИИТИАГ, филиал ЦНИИП Минстроя России; niitag@yandex.ru; г. Москва
Власов В.А., докт. физ.-мат. наук, профессор, ректор ТГАСУ; rector@tsuab.ru; г. Томск
Волокитин Г.Г., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой прикладной механики и материаловедения ТГАСУ; 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; г. Томск
Дегтярев В.В., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой гидротехнического строительства, безопасности и экологии НГАСУ (Сибстрин); ngasu_gts@mail.ru; г. Новосибирск
Дзюбо В.В., докт. техн. наук, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения ТГАСУ; dzv1956@mail.ru; г. Томск
Ефименко В.Н., докт. техн. наук, зав. кафедрой автомобильных дорог ТГАСУ; svefimenko_80@mail.ru; г. Томск
Ефименко С.В., докт. техн. наук, декан дорожно-строительного факультета ТГАСУ; svefimenko_80@mail.ru; г. Томск
Есаулов Г.В., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, проректор по научной работе МАРХИ; gvesaulov@raasn.ru; г. Москва
Жерардо М.Ч., докт. наук, профессор инженерного факультета Международного дистанционного университета UNINETTUNO; g.cennamo@uninettunouniversity.net; г. Рим, Италия
Ильичев В.А., докт. техн. наук, профессор, вице-президент РААСН, академик РААСН; ilyichev@raasn.ru; г. Москва
Иняхотов И.С., докт. техн. наук, профессор, директор инженерно-строительного института СФУ; 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; г. Турин, Италия
Ковлер К.Л., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой строительных материалов и технологий Технион – Израильский технологический институт; cvrkost@technion.ac.il; г. Хайфа, Израиль
Копаница Н.О., докт. техн. наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ; kopanitsa@mail.ru; г. Томск
Кудяков А.И., докт. техн. наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, советник РААСН; kudyakov@tsuab.ru; г. Томск
Кумляк О.Г., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой железобетонных конструкций ТГАСУ, советник РААСН; kumpyak@yandex.ru; г. Томск
Лежава И.Г., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, вице-президент РААСН, профессор МАРХИ; lezhavailia@gmail.com; г. Москва
Морозов В.И., докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, зав. кафедрой строительных конструкций СПбГАСУ; morozov@spbgasu.ru; г. Санкт-Петербург
Овсянников С.Н., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой архитектуры гражданских и промышленных зданий ТГАСУ; ovssn@tsuab.ru; г. Томск
Плачиди Л.Л., докт. наук, доцент инженерного факультета Международного дистанционного университета UNINETTUNO; 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; г. Томск
Пустоветов Г.И., докт. архитектуры, профессор, чл.-корр. РААСН, советник ректората НГУАДИ; pustovetovgi@gmail.com; г. Новосибирск
Сколубович Ю.Л., докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, ректор НГАСУ (Сибстрин); sjl1964@mail.ru; г. Новосибирск
Травуш В.И., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, вице-президент РААСН; travush@mail.ru; г. Москва
Цветков Н.А., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой теплогазоснабжения ТГАСУ; nac@tsuab.ru; г. Томск
Чернышов Е.М., докт. техн. наук, профессор, председатель президиума Центрального отделения РААСН, академик РААСН; chem@vgasu.vrn.ru; г. Воронеж
Шубин И.Л., докт. техн. наук, чл.-корр. РААСН, директор НИИСФ РААСН; niisf@niisf.ru; г. Москва
Яненко А.П., докт. техн. наук, профессор кафедры гидротехнического строительства, безопасности и экологии НГАСУ (Сибстрин); 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; «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, а также на сайте «Вестник ТГАСУ»: <https://vestnik.tsuab.ru>

Научное издание

ВЕСТИК ТГАСУ № 2 – 2021

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 23.04.2021. Формат 70×108/16. Гарнитура Таймс.
Уч.-изд. л. 11,86. Усл. печ. л. 14,09. Тираж 200 экз.
Зак. № 46.

Адрес редакции: 634003, Томск, пл. Соляная, 2, тел. (3822) 65-37-61, e-mail: vestnik_tgasu@tsuab.ru
Отпечатано в ООП ТГАСУ, Томск, ул. Партизанская, 15

© Томский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2021

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

VESTNIK
TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO
ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA

JOURNAL

OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Volume 23

№ 2 2021
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, Tomsk, Russia
2. Akimov P.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Chief Academic Secretary; pavel.akimov@gmail.com, Moscow, Russia
3. Belostotskii A.M., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Director General Research Center StaDiO; 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, Moscow, Russia
5. Chernyshov E.M., DSc, Professor, RAACS Academician, Chairman of the Presidium of RAACS Central Regional Branch; chem@vgasu.vrn.ru, Voronezh, Russia
6. Chiaia B., PhD, Professor, Politecnico di Torino (Polytechnic University of Turin); 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, Novosibirsk, Russia
8. Dzyubo V.V., DSc, Professor, Department of Water Supply and Sewage Systems, TSUAB; 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, Tomsk, Russia
10. Efimenko S.V., DSc, Dean of Road Engineering and Construction Faculty, TSUAB; 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, Moscow, Russia
12. Girardot M.C., DSc, Professor, Engineering Dept., International Telematic University UNINETTUNO; 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, Tomsk, Russia
14. Il'ichev V.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Vice President; ilyichev@raasn.ru, Moscow, Russia
15. Inzhutov I.S., DSc, Professor, Director School of Engineering and Construction, SibFU; iinzhutov@sfu-kras.ru, Krasnoyarsk, Russia
16. Kopanitsa N.O., DSc, Professor, Building Materials and Technologies Dept., TSUAB; 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, Haifa, Israel
18. Kudiyakov A.I., DSc, Professor; RAACS Adviser, Head of Construction Engineering Technology Dept., TSUAB (Tomsk, Russia); kudiyakov@tsuab.ru
19. Kumpyak O.G., DSc, Professor; RAACS Adviser, Head of Reinforced Concrete and Masonry Structures Dept., TSUAB; kumpyak@yandex.ru, Tomsk, Russia
20. Lezhava I.G., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Vice President, Moscow Architectural Institute (State Academy); lezhavailia@gmail.com, Moscow, Russia
21. Morozov V.I., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Head of Engineering Constructions Dept., SPSUACE; morozov@spbgasu.ru, St-Petersburg, Russia
22. Ovsyannikov S.N., DSc, Professor, Head of Architecture of Civil and Industrial Buildings Dept., TSUAB; ovsnn@tsuab.ru, Tomsk, Russia
23. Plachidi L.L., DSc, A/Professor, Engineering Dept., International Telematic University UNINETTUNO; luca.placidi@uninettunouniversity.net, Roma, Italy
24. Polyakov E.N., DArts, Professor; Member of the Union of Architects of Russia; Theory and History of Architecture Dept., TSUAB; 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, Novosibirsk, Russia
26. Skolubovich Yu.L., DSc, Professor, RAACS Correspondent Member, Rector Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering; sjl1964@mail.ru, Novosibirsk, Russia
27. Shubin I.L., DSc, RAACS Corresponding Member, Director Structural Physics Research Institute, RAACS; niisf@niisf.ru, Moscow, Russia
28. Tsvetkov N.A., DSc, Professor, Head of Heat and Gas Supply Dept., TSUAB; nac@tsuab.ru, Tomsk, Russia
29. Travush V.I., DSc, Professor, RAACS Vice President, RAACS Academician; travush@mail.ru, Moscow, Russia
30. Vlasov V.A., DSc, Professor, Rector, TSUAB; rector@tsuab.ru, Tomsk, Russia
31. Volokitin G.G., DSc, Professor, Head of Applied Mechanics and Materials Science Dept., TSUAB; 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, 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; <https://online.bookchamber.ru/book/ru/>; <https://www.lib.tomsk.ru>; <https://www.ebsco.com>; <https://cyberleninka.ru>; www.iprbookshop.ru; <https://vestnik.tsuab.ru>

Scientific Edition

VESTNIK TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA
JOURNAL OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE № 2 – 2021

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: 23.04.2021. Paper size: 70×108/16. Typeface: Times New Roman
Published sheets: 11,86. Conventional printed sheets: 14,09. Print run: 200 copies
Order N 46.

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

© Tomsk State University
of Architecture and Building, 2021

С О Д Е Р Ж А Н И Е

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

Громова А.С., Литвинова О.Г. Проектирование хосписов в концепции салютогенеза (ТГАСУ, г. Томск)	9
Николаева А.С., Колодин К.И. Принципы формирования архитектуры туристических комплексов в щадящем режиме освоения озера Байкал (СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург)	24
Егорова С.С., Закирова Ю.А. Градостроительная модель формирования образовательного кластера сельскохозяйственной специализации в структуре Казанской агломерации (КГАСУ, г. Казань)	33
Михайленко Д.В., Резницкая Л.М. Проектная концепция эколого-археологического комплекса «Донская Троя» (ААИ ЮФУ, г. Ростов-на-Дону)	46

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Гаврилов А.А., Гребенюк Г.И., Максак В.И., Морозов Н.А. Исследование частот собственных колебаний металлического стержня с моделированием трещины (ОГУ, г. Оренбург, ТГАСУ, г. Томск)	56
Мелёхин Е.А. Модульные трёхгранные фермы плоских покрытий (ТГАСУ, г. Томск)	65

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Власов В.А., Скрипникова Н.К., Григорьевская Д.К., Шеховцов В.В. Разработка и исследование составов теплоизоляционных лакокрасочных материалов с использованием зольных микросфер (ТГАСУ, г. Томск)	79
Сорокина Е.А., Копаница Н.О. Анализ и оценка методов определения прочности бетона для аддитивной технологии (ТГАСУ, г. Томск)	87

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

Белоус А.Н., Белоус О.Е., Крахин С.В. Перераспределение теплового потока в толще ограждающей конструкции при суточном цикле летнего периода (ДонНАСА, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка)	96
---	----

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Воронов А.А., Максимова С.В., Осипова Е.Ю. Очистка талых вод урбанизированных территорий с использованием фитосорбентов (ТИУ, г. Тюмень, ТГАСУ, г. Томск)	105
--	-----

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Ющубе С.В., Подшивалов И.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния основания кирпичного здания повышенной этажности на монолитной фундаментной плите (ТГАСУ, г. Томск)	118
--	-----

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

Хижняков В.И., Негодин А.В., Бакшанский Р.Ю. О динамической устойчивости речных подводных переходов магистральных трубопроводов (ТГАСУ, г. Томск)	133
Бехзоди Б., Андрианов К.А., Зубков А.Ф. Моделирование тепловых процессов при строительстве покрытий нежесткого типа с применением холодных асфальтобетонных смесей (ТГТУ, г. Тамбов)	146

C O N T E N T S

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Gromova A.S., Litvinova O.G. Salutogenesis concept for hospice design (Tomsk).....	9
Nikolaeva A.S., Kolodin K.I. Sparingly developed tourist places on Lake Baikal (St.-Petersburg).....	24
Egorova S.S., Zakirova Yu.A. City planning model of educational agricultural cluster in Kazan urban agglomeration (Kazan)	33
Mikhailenko D.V., Reznitskaya L.M. The concept of ecological and archeological site "Donskaya Troya" (Rostov-on-Don).....	46

BUILDING AND CONSTRUCTION

Gavrilov A.A., Grebenyuk G.I., Maksak V.I., Morozov N.A. Crack modeling of metal rod eigen-frequencies (Orenburg, Tomsk).....	56
Melekhin E.A. Modular trihedral trusses of flat roofs (Tomsk)	65

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Vlasov V.A., Skripnikova N.K., Grigorevskaya D.K., Shekhovtsov V.V. Development of heat insulating coatings comprising ash microspheres (Tomsk).....	79
Sorokina E.A., Kopanitsa N.O. Analysis of concrete strength determination methods for additive manufacturing (Tomsk).....	87

HEATING, VENTILATION, AIR CONDITIONING (HVAC), LIGHTING SYSTEMS AND GAS NETWORKS

Belous A.N., Belous O.E., Krakhin S.V. Heat flow redistribution in wall structure during diurnal cycle in summer (Makiivka, Donetsk People's Republic)	96
--	----

WATER SUPPLY, SEWERAGE, BUILDING SYSTEMS OF WATER RESOURCE PROTECTION

Voronov A.A., Maksimova S.V., Osipova E.Yu. Purification of urbanized melt water with plant sorbents (Tyumen, Tomsk)	105
--	-----

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Yushchube S.V., Podshivalov I.I. Stress-strain state finite element modeling of concrete foundation of a multistory brick building (Tomsk)	118
---	-----

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

Khizhnyakov V.I., Negodin A.V., Bakshanskiy R.Yu. Dynamic stability of submerged pipelines (Tomsk)	133
Behzodi B., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Modeling of thermal processes in construction of nonrigid pavements using bitumen concrete mixes (Tambov)	146

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 725.51

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-9-23

А.С. ГРОМОВА, О.Г. ЛИТВИНОВА,

Томский государственный архитектурно-строительный университет

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ХОСПИСОВ В КОНЦЕПЦИИ САЛЮТОГЕНЕЗА

Теория салютогенеза широко используется в здравоохранении, однако многие архитекторы, проектирующие здания хосписов, редко оперируют её принципами при создании проектов. В статье рассмотрены ключевые аспекты салютогенеза, приведены примеры, демонстрирующие работу по адаптации больных в паллиативных учреждениях, которая напрямую влияет на архитектуру зданий, организацию планировочной и функциональной модели.

Теория салютогенеза заключается в том, что существует три вида внутренних ресурсов, которые поддерживают и укрепляют здоровье человека, их совокупность обеспечивает принцип когерентности – движения вперед, оно противостоит энтропийным силам болезни и немощи. Принцип когерентности состоит из ресурсов, которые улучшают управляемость – способность поддерживать гомеостаз и физическую функцию; ресурсов, которые улучшают понятность, постижимость – способность увидеть порядок и смысл даже в неопределенных ситуациях; ресурсов, которые обогащают чувство осмысленности, значимости – желания и причины, которые в первую очередь дают нам необходимость сопротивляться болезни. В исследовании рассмотрены теоретические аспекты салютогенеза в контексте создания специализированных учреждений.

Ключевые слова: архитектура паллиативных учреждений; проектирование; паллиативная помощь; хоспис; теория архитектуры.

Для цитирования: Громова А.С., Литвинова О.Г. Проектирование хосписов в концепции салютогенеза // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 9–23.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-9-23

A.S. GROMOVA, O.G. LITVINOVA,

Tomsk State University of Architecture and Building

SALUTOGENESIS CONCEPT FOR HOSPICE DESIGN

The salutogenesis concept is widely used in a healthcare system, but many architects of hospices do not use this term. This paper describes the key aspects of the salutogenesis concept, work on patient adaptation in palliative care facilities, which directly affects the building architecture and organization of the planning and functional model

The salutogenesis concept is based on three types of internal resources that support and strengthen health, their combination provides a coherence or forward movement, which resists to the entropic forces of disease and infirmity. The coherence consists of resources that improve: manageability (the ability to maintain homeostasis and physical function); resources that improve comprehensibility (the ability to see order and meaning even in uncertain situations); resources that enrich the meaningfulness, significance (desire and reasons for resisting illness). The paper considers the theoretical aspects of the salutogenesis concept for creating specialized institutions.

Keywords: architecture of palliative care facilities; design; palliative care; hospice; theory of architecture.

For citation: Gromova A.S., Litvinova O.G. Proektirovanie khospisov v kontseptsii salyutogeneza [Salutogenesis concept for hospice design]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 2. Pp. 9–23.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-9-23

Введение

В начале XXI в. термин «салутогенный» стал известным словом для презентации архитектуры здравоохранения и ухода за больными. Этот термин был придуман, чтобы описать модель социально-экологических воздействий на здоровье, однако в интерпретации проектировщиков он означает не среду, направленную на восстановление, а скорее включение объектов природы при планировании генеральных планов, например, парков или озелененных территорий. Современная архитектура нуждается в новой теории, чтобы установить, могут ли представления о природе быть восстанавливающими в каждом конкретном случае и, что более важно, иметь возможность выйти за рамки этой аксиомы и найти другие способы проектирования архитектурной среды, способной восстанавливать психологическое здоровье и улучшать качество жизни [4].

Эстетические изменения дизайна в учреждениях хосписов могут улучшить показатели здоровья и качество жизни для пациентов. Существует ряд теорий для объяснения этих эффектов, однако большинство из них ограничены лишь определенными стимулами, выявленными под микроскопом теоретиков. Примеры включают эволюционную гипотезу, объясняющую влияние «взглядов на природу» [34], и экологическую теорию Лоутона и Нахемова [30], которая утверждает, что в торговле есть «золотая середина» – момент между дизайном для комфорта и дизайном для решения умственных и физических проблем. Другие утверждают, что наиболее важными вопросами для здоровья в дизайне являются чистота и борьба с патогенами [11]. Также были рассмотрены естественное и искусственное освещение, дизайн звукового ландшафта и такие вещи, как цвет стен [26, 35], а также расположение мебели в психиатрических учреждениях [7, 18].

Все эти теории важны для проектирования медико-социальных учреждений, однако они все игнорируют тот факт, что эта архитектура может быть психологически управляемой в лучшую или худшую сторону. Архитектура осуществляет это путем предоставления повествовательного контекста, который влияет на поведение человека, нервные и эндокринные системы, через

воздействие на мозг и тело архитектура может напрямую влиять на здоровье [24]. Теория А. Антоновского обеспечивает доступную модель для определения этих эффектов в дизайне [21].

Салютогенная теория не является идеальной системой оздоровления [32], но как теория она имеет область и перспективу, которых нет у других способов понимания здоровья [4]. Салютогенез – это способ понимания всего спектра здоровья и оздоровления, независимо от специфики и деталей. Другими словами, он обеспечивает всеобъемлющую нарративную структуру, которая выходит за рамки индивидуальных различий между людьми, а также различий между диагнозами, обстоятельствами, изменениями среды и т. д. Салютогенная теория полезна для подходов, основанных на «обобщении», для охвата спектров благополучия и здоровья/болезней, и как таковая она полезна для управления косвенными, сложными, неясными или неизвестными факторами в состоянии здоровья [22, 28].

Однако отсутствует четкое понимание теории, необходимой для разработки и расширения сферы применения салютогенных вмешательств. Исходя из вышеизложенного, в статье рассматривается применение основополагающих принципов салютогенеза в проектировании архитектуры объектов здравоохранения.

Основа салютогенеза – чувство когерентности

Салютогенез предполагает, что хорошее эмоциональное, психическое и соматическое здоровье поддерживается благодаря динамической способности адаптироваться к меняющимся жизненным обстоятельствам. Верно и обратное – силы, которые препятствуют способности адаптироваться, оказывают этиологическое влияние на болезнь. Человек «поддается болезни», когда требования мира к нему превышают его способность справиться с ними. Таким образом, микроб сам по себе недостаточен для того, чтобы вызвать заболевание, – его необходимо культивировать в среде с недостаточной способностью к резистентности [1]. Модели, которые принимают «множественную причинность», как правило, описывают силы, которые вызывают дезадаптивность, как «стрессоры», комплекс воздействий, охватывающий все, от радостных событий до жизненных трагедий и банальных забот [3]. По сути, все может считаться стрессором, делая стресс бесполезным понятием. С другой стороны, усилия, направленные на улучшение адаптивности, достаточно специфичны, чтобы предлагать практические и конструктивные решения. Эти силы были обозначены как «чувство согласованности», также известное как ЧС [2].

Когда человек не в состоянии приспособиться к обстоятельствам и переживаниям, физическое или психическое здоровье «ухудшится» [1]. Но, если человек сосредоточит внимание на чувстве согласованности и ресурсах, возникает основа, которая может быть легко применена к проектированию учреждений, направленных на оказание паллиативной помощи. Чувство согласованности, поддерживающее проектирование, может помочь высвободить ресурсы, которые обеспечивают устойчивость к болезням, и уменьшить дезинтеграционные силы, которые в первую очередь вызывают дезадаптацию.

Принципы салютогенеза, которые необходимо учитывать при проектировании хосписов

В основе принципа когерентности лежат чувства, которые должны испытывать пациенты хосписов. Как правило, работники хосписов направляют основной объем своих действий на достижение этих чувств. Здесь большое значение приобретает комплекс архитектурных элементов как в интерьере, так и в экстерьере, который должен быть направлен на поддержание внутренних жизненных ресурсов человека.

– *Чувство согласованности* – это сумма всех обобщенных ресурсов сопротивления (или ОРС – далее по тексту «ресурсы») за вычетом всех обобщенных дефицитов сопротивления [3].

– *Чувство понятности*, постижимости (comprehensibility), при высокой выраженности которого мир рассматривается как разумный и постижимый в принципе, а события жизни можно понять и предвидеть. Человек с таким чувством не избегает неопределенных ситуаций, он уверен, что в них можно обнаружить порядок и смысл.

– *Чувство управляемости*, подконтрольности (manageability), при котором человек полагает, что ему доступны достаточные ресурсы, как внутренние, так и внешние, для выполнения требований, предъявляемых к нему различными ситуациями. Это чувство дает веру не в то, что человек способен предотвратить несчастье, а в то, что, используя собственные силы и способности или опираясь на помощь друзей, коллег, Бога и прочее, он сможет справиться с несчастьем и его пережить [23].

– *Чувство осмысленности* (meaningfulness) – эмоциональное переживание того, что жизненные задачи заслуживают усилий по их разрешению и активного включения в процесс их достижения. Осмысленность у А. Антоновского тесно связана с включенностью, она указывает на то, что мир небезразличен человеку, его задачи имеют личное значение и мотивируют на активность. В течение жизни индивидуальный уровень чувства когерентности может меняться.

Взаимосвязь биохимических ответов и архитектурной среды

Люди ведут себя совершенно по-разному в ситуациях, когда им что-то угрожает и когда они счастливы [8, 27, 17]. Они ведут себя более вежливо, когда полны высоких эмоций, таких как благоговение. Эти эмоции не являются поверхностными и имеют реальные долгосрочные последствия [14]. Наука о воздействии архитектурной среды на здоровье относительно нова и требует больше исследований, но предполагается, что нейротрансмиттеры реагируют на стимулы окружающей среды, следовательно, реагируют на дизайн архитектуры [24]. Например, ацетилхолин регулирует баланс, гомеостаз, мышечный тонус, а также большинство вещей, которые мы ассоциируем с комфортом – тепло тела, чувства осязания и голода [9]. Считается, что свет в помещениях смягчает серотонин и гормоны на серотонинергическом пути, такие как мелатонин [10]. В свою очередь, эти гормоны влияют на циркадные ритмы, контроль воспаления и т. д. Другим нейротрансмиттером, который может быть в высокой степени реагирующим на раздражители окружающей среды,

является дофамин [29], и именно этот нейротрансмиттер наиболее тесно связан с эмоциями.

Дофамин интересен тем, что он непосредственно связан с многими психическими заболеваниями [25]. Дофамин имеет сильные связи в лимбической области мозга [16], – области, которая характеризуется как центр повествовательного познания и эмоционального равновесия. Гипотеза состоит в том, что дофамин опосредует интенсивность нашего опыта историй. Эти истории составлены из информации, которую собирают из окружающей искусственной среды гиппокампы (которые смягчают структуру истории) и миндалины (которые смягчают чувство индивидуальности: ощущение, что история обо мне) [32]. К сожалению, когда люди психически больны и их дофамин не регулируется, они могут страдать слишком сильно от мелочей и из-за недостаточно важных событий. Соответственно человек в архитектурном пространстве индивидуализирует историю своего местонахождения.

Гипоталамус, еще один лимбический орган, работает как переключатель: когда другие органы сигнализируют о том, что возникающая история указывает на опасность, гипоталамус выключает все трудоемкие и творческие части мозга и вместо этого включает автоматический и инстинктивный режим. Гипоталамус также запускает эндокринную систему в режим чрезвычайной ситуации, замыкая нормальный эндокринный каскад. Холестерин блокируется от переработки в эстроген, прогестерон, тестостерон и другие желательные и необходимые гормоны, как обычно. Вместо этого холестерин остается в сыром виде, готовый спровоцировать различные нарушения кровообращения вплоть до летального исхода (т. к. это полезная защита первой линии от кровотечений или сердечной недостаточности). Наряду с этим, аргинин, вазопрессин, кортикотропин высвобождают кортизол и другие гормоны, которые важны в чрезвычайных ситуациях. Эти гормоны определяют многое из того, что мы чувствуем на эмоциональном уровне, но, помимо защитной функции организма от голода, обезвоживания и кровопотери, и т. к. нам не всегда нужно испытывать панику или злость, большинство негативных реакций, вызываемых этими гормонами, являются излишними. Например, когда окружающая среда физически безопасна и целью является укрепление здоровья. После длительного воздействия негативных эмоций гормональные реакции напрямую связаны с эпидемиологией «болезни образа жизни».

Эстетика, искусственная среда и здоровье

Традиционно идея о том, что эстетика оказывает какое-либо влияние на здоровье (и даже на смертность), представляется суеверной и иногда даже оккультной, поэтому она не так широко принята, как следовало бы [24]. Концепция эстетического воздействия на здоровье была научно проверена не один раз, выполнено множество исследований, опровергающих нулевую гипотезу о том, что между эстетикой среды и состоянием здоровья не существует взаимосвязи. В 2005 г. Карин Дейкстра в результате системного анализа составила обзор для определения воздействия физических факторов окружающей среды в медицинских учреждениях на здоровье и благополучие пациентов. Она выявила и проанализировала 30 рецензируемых статей, где

представлены результаты от эффектов воздействия свойств архитектурной среды на пациентов, способствовавших потенциальному выздоровлению. В выводах приведены убедительные статистические данные [12] об ускорении выздоровления на 30,8 и 38 %. Более низкая смертность была обнаружена, когда пациентам с психиатрическими расстройствами обеспечивали освещенные солнцем комнаты [5, 6].

С салютогенной точки зрения такие результаты имеют значение: когда люди здоровы, они демонстрируют теоретический избыток ресурсов сопротивления, поэтому эстетические улучшения являются излишними, но когда люди болеют, они страдают от отсутствия равновесия между ухудшением и выздоровлением, поэтому любое подлинное влияние (в лучшую или худшую сторону) должно отражаться на результатах.

Есть ряд способов взаимоотношения нашего тела с внешним миром. Во-первых, существуют физические отношения: встроенная среда изобилует ограничениями – такими как заборы и стены, и возможностями – такими как проходы, мосты или окна, и они определяют многие из решений, которые мы принимаем. Как указывалось выше, традиционный взгляд на воздействие антропогенной среды на здоровье ориентирован на то, насколько хорошо она обеспечивает базовую функциональность и защиту. Это особенно актуально в области здравоохранения, поскольку его главным требованием является то, чтобы встроенная среда поддерживала более эффективное сопровождение пациентов, более надежные клинические процедуры, лучший контроль над инфекцией и т. д.

Архитектура и ресурс управляемости для пациентов

Традиционная среда здравоохранения ориентирована только на один из трех ресурсов салютогенеза – управляемость. В хосписах создают среду более управляемой для персонала с помощью централизованных служб питания и уборки, а также более управляемой для пациентов с помощью внутривенных капельниц, инкубации, систем отопления и охлаждения, катетеризации, диализа, вентиляции, искусственного кровообращения. Находясь в больнице, человек поражается тому, насколько жизнь здесь может поддерживаться автоматически – ведь пациентам даже не нужно дышать самостоятельно. Можно утверждать, что управляемость традиционно является единственным организующим принципом при проектировании медицинских учреждений: лучший надзор за пациентом, лучший контроль над инфекцией, более эффективное питание, прачечная, аптека, регистрация и даже парковка ставятся во главу угла по отношению к причудливым вещам, таким как эстетика.

По своей сути участие архитектора в улучшении управляемости в сфере здравоохранения заключается в оптимизации всех услуг, которые ранее уже были учтены. Однако архитектор, вооруженный пониманием салютогенеза, может пойти гораздо дальше, обращая внимание на то, как дизайн может улучшить ресурсы пациента для лучшего самочувствия [19].

Классическая планировка представляется с централизованными постами медсестер, чтобы улучшить управляемость персонала. Отказ от центральных станций персонала тем самым поворачивает локус контроля со стороны пер-

сонала обратно к пациентам, чтобы предотвратить потерю независимости и последующую атрофию жизненно важных навыков. То есть, предоставив альтернативные возможности для мониторинга пациентов, мы определяем неформальные места, где медсестры могут сидеть и наблюдать за большинством событий в отделении. В данной планировке хорошее наблюдение имеет каждый, а не только персонал. Это важный ответ на модели лечения, ориентированные на восстановление (рис. 1).

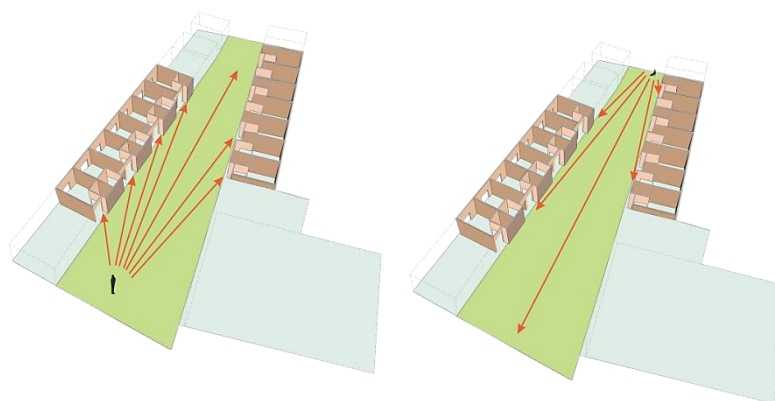


Рис. 1. Схема альтернативных возможностей для мониторинга пациентов. Автор А.С. Громова

Архитектура и ресурс понятности для пациентов

В отличие от традиционного подхода к архитектуре учреждений паллиативной помощи, салютогенный дизайн предлагает подчинить процессу проектирования все основные ресурсы для достижения когерентного состояния больного.

Внутренний ресурс состояния для больного человека, такой как *понятность*, – это способность понимать и согласовывать условия, в которых мы находимся. Как заметил Джон Донн, английский поэт и проповедник, больницы имеют давние традиции как места, где такое понимание делегируется медицинскому персоналу [15]. В хосписе редко ожидают, что пациент поймет, от чего он страдает или как больничный сервис сделает его лучше. Когда пациенты попадают в хоспис, регистратор или медсестра по уходу скажут им, куда идти, и врач обязан знать, что с ними не так и как лечить их недуг. Но эта ситуация меняется. В настоящее время пациенты имеют в своем распоряжении инструменты для самодиагностики и лечения, и эта осведомленность стала необходимой для поддержания хорошего здоровья и раннего выявления заболеваний [33].

В проектировании современных хосписов основной упор делается на навигацию, которая должна быть интуитивно понятна и которая в меньшей степени помогает пациентам помочь себе. Архитектура теперь направлена на внешний вид для глобальной ориентации по узнаваемым городским образцам улиц и использованию отличительных ориентиров, таких как скульптуры. Но понятность в салютогенном смысле – это гораздо больше, чем просто знать, куда идти, или знать о состоянии здоровья. Что еще более важно, понятность

предназначена для повышения или усиления эффективности человека в его начинаниях.

Тогда возникает вопрос: как архитектура здравоохранения должна усилить наше чувство *понятности*, то есть личного понимания – того, что мы воспринимаем как контекст среды, в которой мы находимся? Наиболее важные аспекты *понятности* в учреждениях паллиативной помощи вращаются вокруг повествований о последовательном опыте пациента при обсуждении «пути пациента».

Чувство понятности способно обеспечить ощущение контроля и личную безопасность, однако наша естественная склонность ассоциировать окружающую среду также может разрушить доверие. Пациент может слишком легко почувствовать себя как на съемочной площадке медицинской драмы: на кровати, в окружении синих ширм, рядом с машиной с красным мигающим светом. В медицинской драме подобная психологическая установка (настрой) означает неизбежную катастрофу, и архитектурный словарь приобретает тот же оттенок. Поэтому следует избегать комнат без окон, машин с мигалками, синих штор и ленточных подсветок.

В соответствии с этими принципами планировку новой модели хосписа необходимо представлять в виде центральной «площади» с прилегающими к ней необходимыми помещениями для больных. Все это предназначено для максимизации и расширения собственных возможностей и для формирования ощущения, что все будет хорошо (рис. 2). На рис. 3 представлена функциональная схема атриума – «площади», где заложены различные общественные функции, предоставляющие пациентам возможность разнообразить досуг. Например, заниматься садоводством вне зависимости от физических ограничений и времени года, чтобы развивать навыки и демонстрировать доказательства личного успеха.



Рис. 2. Планировочная структура 1-го этажа учреждения для паллиативной помощи. Автор А.С. Громова



Рис. 3. Мудборд функциональной наполняемости атриумного пространства учреждения для паллиативной помощи. Автор А.С. Громова

Диагностический центр израильской клиники «Хадасса» (Hadassah) (рис. 4), расположенный в Московском международном медицинском кластере (МММК) «Сколково», был отмечен на современных каналах СМИ: «Мы делали больницу, не похожую на больницу», – говорит Асадов. В атриуме посетителей встречают газоны и живые растения, полноценные деревья в кадках, которые создают ощущение природной среды, легкая трансформируемая мебель, которая может быть использована для общественных мероприятий.

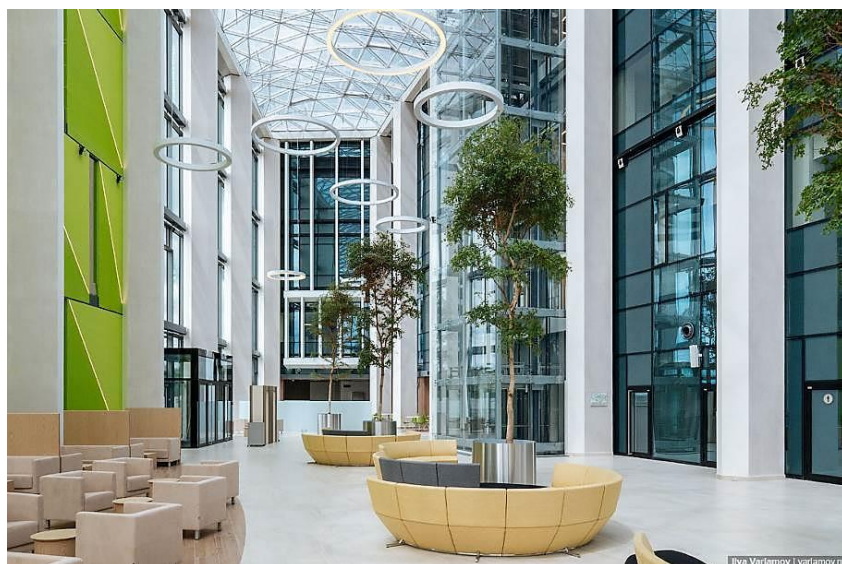


Рис. 4. Диагностический центр израильской клиники «Хадасса» (URL: varlamov.ru)

Тема позитивного оздоровляющего пространства продолжается и в интерьерах лечебного корпуса. Так, в каждой палате будет стена, имитирующая деревянную панель, на окнах шторы из бактерицидного материала. Это создаст ощущение домашнего уюта, что очень важно для пациентов, которые проводят в стационаре много времени. Это здание было специально спроектировано, чтобы дать пациентам «динамическое чувство уверенности в том, что существует высокая вероятность того, что все будет работать так, как этого можно ожидать» [3].

Архитектура и ресурс значимости для пациентов

Поскольку *значимость* в жизни человека важна для чувства *согласованности*, это должно быть главной заботой архитекторов при проектировании для улучшения здравоохранения. Но *значимость* имеет внутренние отношения с реальным миром за пределами объекта – какого: наиболее значимые мысли людей, вероятно, будут касаться животных, глобальной экологии, религии, политики, спорта, семьи, друзей, музыки, искусства, литературы, возможно, осуществление власти. Здания больниц не являются идеальным местом для подтверждения смысла жизни, потому что пациенты физически удалены от большей части того, что придает жизненный смысл: они полны бесконечных коридоров, ложных обещаний («вы скоро почувствуете себя лучше; вы можете почувствовать себя немного некомфортнее...»), ложных тревог, институциональной эстетики и непоследовательной помощи [36]. Больничная жизнь человека также создаёт социальную изоляцию, ограничивая часы посещения друзей и семьи и запрещая домашних животных. Однако учреждения хосписов в большинстве своем не столь категоричны и позволяют не только круглосуточное посещение, но и предлагают комнаты для ночного отдыха родственникам больных.

Тем не менее архитектор здравоохранения может создавать проекты больниц для повышения *значимости* пациентов. Люди очень редко активно ищут смысл, но правильный контекст может стимулировать поиск или, по крайней мере, обогащать его. Больница Кху Тейк Пэт в Сингапуре окружена обширным парком со своей уникальной флорой и фауной – у них даже есть реестр бабочек! В первую очередь это сделано для вдохновения пациентов, которые должны знать о чудесах природы.

В больнице Вилкания, которая преимущественно обслуживает коренное население в Австралии, архитектор Диллон Комбумерри спроектировал жилье для пациентов на первом этаже, с широкими верандами, выходящими на природные ландшафты, чтобы обеспечить место для посещения племени (обычно люди прибывают в больших компаниях, а не индивидуально) и чтобы пациенты знали, что их культурные корни уважаются и признаются.

Рассмотрев примеры организации больничных пространств с учётом трёх основных ресурсов, направленных на достижение когерентности пациента, мы видим, что теория салютогенеза в проектировании хосписов приобретает сегодня большее значение в обществе, чем когда-либо.

Заключение

Синце Дилани привнес концепцию салютогенеза в архитектуру, он возглавил Международную академию дизайна и здравоохранения для продвиже-

ния теории салютогенеза в архитектуре [13]. В результате деятельности академии и ежегодных премий за лучший проект популярность этой концепции возросла, она стала модным словом в презентации архитектурных проектов. Основным результатом здесь является то, что салютогенез теперь считается уважаемой и поощряемой целью архитектуры и дизайна. Недостатком является только то, что термин «салютогенный» часто используется архитекторами как «дружелюбный» или «озелененный», что не является правдой. «Красивый» и «озелененный» часто являются результатом салютогенных подходов, но в самой теории заложен более широкий смысловой потенциал. В настоящее время существуют методы для внесения салютогенных принципов в структуру здравоохранения [19] и неотложной медицинской помощи [20].

На основании изученных материалов можно вывести следующие подходы по проектированию паллиативных учреждений:

- дневное освещение; чем больше естественного света, тем легче протекает болезнь. На этот же результат работает и вид из окна на природный ландшафт;

- понятная и легкая навигация;

- комфортная акустика, звуки не должны мешать ни больным, ни докторам;

- регулирование внутреннего микроклимата, и, он должен меняться в зависимости от предпочтений;

- у каждого пациента должно быть свое личное пространство, современный мировой тренд – индивидуальные палаты;

- интерьеры в лечебном учреждении не должны быть безликими или стандартными, желательно включать элементы искусства;

- у персонала должны быть хорошие условия для работы и отдыха, это напрямую влияет на общение с пациентами;

- искусственный свет, меняющийся в зависимости от времени суток: на самом базовом уровне некоторые факторы окружающей среды универсальны, как циркадные ритмы. Утренний свет – это свет синего спектра, который заставляет наши тела высвобождать кортизол и будит нас; вечерний свет, наоборот, является красным светом спектра, который заставляет наши тела выделять мелатонин, подготавливая нас ко сну и физическому восстановлению.

В целом теоретические принципы салютогенеза применимы не только к организации внутреннего пространства, но и при формировании объемно-планировочного решения хосписов. Входные группы, переходы между отделениями не должны становиться препятствием для пациентов. Коридорная система расположения лечебных кабинетов и палат не позволяет обеспечить в полной мере ресурсы когерентности, поэтому необходимо вырабатывать новые типы компоновки помещений, при этом сознавая, что при выходе из палаты пациент должен попадать в интересное, безопасное и совершенно понятное ему пространство.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Antonovsky A. Breakdown: A needed fourth step in the conceptual armamentarium of modern medicine // *Social Science & Medicine* (1967). 1972. V. 6. № 5. P. 537–544.
2. Antonovsky A. *Health, Stress and Coping*. San Francisco : Jossey-Bass, 1979.

3. Antonovsky A. Unraveling the mystery of health: How people manage stress and stay well. Jossey-bass, 1987.
4. Antonovsky A. The salutogenic model as a theory to guide health promotion // Health promotion international. 1996. V. 11. № 1. P. 11–18.
5. Beauchemin K.M., Hays P. Sunny hospital rooms expedite recovery from severe and refractory depressions // Journal of affective disorders. 1996. V. 40. № 1–2. P. 49–51.
6. Beauchemin K.M., Hays P. Dying in the dark: sunshine, gender and outcomes in myocardial infarction // Journal of the Royal Society of Medicine. 1998. V. 91. № 7. P. 352–354.
7. Bitterman N. Psychiatric ward dayroom: Human factors and design issues // World Health Congress. Brisbane: International Academy of Design and Health, 2013.
8. Calhoun J.B. Population density and social pathology // California Medicine. 1970. V. 113. № 5. P. 54.
9. Changeux J.P. et al. Nicotinic acetylcholine receptors: from molecular biology to cognition. Odile Jacob Publishing Corp, 2005.
10. Rao M.L. et al. Blood serotonin, serum melatonin and light therapy in healthy subjects and in patients with nonseasonal depression // Acta Psychiatrica Scandinavica. 1992. V. 86. № 2. P. 127–132.
11. Dancer S.J. How do we assess hospital cleaning? A proposal for microbiological standards for surface hygiene in hospitals // Journal of Hospital Infection. 2004. V. 56. № 1. P. 10–15.
12. Dijkstra K., Pieterse M., Pruyn A. Physical environmental stimuli that turn healthcare facilities into healing environments through psychologically mediated effects: systematic review // Journal of advanced nursing. 2006. V. 56. № 2. P. 166–181.
13. Dilani A. A new paradigm of design and health in hospital planning // World hospitals and health services: the official journal of the International Hospital Federation. 2005. V. 41. № 4. P. 17–21.
14. Rudd M., Vohs K.D., Aaker J. Awe expands people's perception of time, alters decision making, and enhances well-being // Psychological science. 2012. V. 23. № 10. P. 1130–1136.
15. Donne, J. Emergency initiations and a few steps in my sick. London : Thomas Iones, 1624.
16. Floresco S.B. et al. Modulation of hippocampal and amygdalar-evoked activity of nucleus accumbens neurons by dopamine: cellular mechanisms of input selection // Journal of Neuroscience. 2001. V. 21. № 8. P. 2851–2860.
17. Salmivalli C. Feeling good about oneself, being bad to others? Remarks on self-esteem, hostility, and aggressive behavior // Aggression and violent behavior. 2001. V. 6. № 4. P. 375–393.
18. Devlin A.S. Psychiatric ward renovation: Staff perception and patient behavior // Environment and Behavior. 1992. V. 24. № 1. P. 66–84.
19. Golembiewski J.A. Start making sense: Applying a salutogenic model to architectural design for psychiatric care // Facilities. 2010. V. 28. № 3–4. P. 100–117.
20. Golembiewski J.A. et al. Moving from theory to praxis on the fly: Introducing a salutogenic method to expedite mental health care provision in disaster situations // Australian Journal of Emergency Management, The. 2012. V. 27. № 2. P. 42.
21. Golembiewski J.A. Salutogenic architecture in healthcare settings // The handbook of salutogenesis. 2017. P. 267–276.
22. Golembiewski J.A. The architecture of the psychiatric milieu // Facilities. 2013.
23. Strimpher D.J.W., Gouws J.F., Viviers M.R. Antonovsky's Sense of Coherence Scale related to negative and positive affectivity // European Journal of Personality. 1998. V. 12. № 6. P. 457–480.
24. Le Hunte B., Golembiewski J. Stories have the power to save us: A neurological framework for the imperative to tell stories // Arts and Social Sciences Journal. 2014. V. 5. № 2. Article number: 73 1–4.
25. Golembiewski J.A. The designed environment and how it affects brain morphology and mental health // HERD: Health Environments Research & Design Journal. 2016. V. 9. № 2. P. 161–171.
26. Howes O.D. et al. Midbrain dopamine function in schizophrenia and depression: a post-mortem and positron emission tomographic imaging study // Brain. 2013. V. 136. № 11. P. 3242–3251.
27. Hurst L. The environment in chronic schizophrenia // International Journal of Social Psychiatry. 1960. V. 7. № 1. P. 65–73.

28. Isovich E. et al. Social isolation after a single defeat reduces striatal dopamine transporter binding in rats // *European Journal of Neuroscience*. 2001. V. 13. № 6. P. 1254–1256.
29. Strümpfer D.J.W., Viviers M.R., Gouws J.F. Item-phrasing in Antonovsky's sense of coherence scale related to negative and positive affectivity // *Personality and Individual Differences*. 1998. V. 24. № 5. P. 669–675.
30. Koppiseti S. et al. Reactive oxygen species and the hypomotility of the gall bladder as targets for the treatment of gallstones with melatonin: a review // *Digestive diseases and sciences*. 2008. V. 53. № 10. P. 2592–2603.
31. Lawton M.P., Nahemow L. Ecology and the aging process. 1973.
32. Le Hunte B., Golembiewski J. Stories have the power to save us: A neurological framework for the imperative to tell stories // *Arts and Social Sciences Journal*. 2014. V. 5. № 2. Article number: 73 1–4.
33. Mittelmark M.B., Bull T. The salutogenic model of health in health promotion research // *Global Health Promotion*. 2013. V. 20. № 2. P. 30–38.
34. Parker R. Health literacy: a challenge for American patients and their health care providers // *Health promotion international*. 2000. V. 15. № 4. P. 277–283.
35. Ulrich R.S. Effects of interior design on wellness: Theory and recent scientific research // *Journal of health care interior design*. 1991. V. 3. № 1. P. 97–109.
36. Vaaler A.E., Morken G., Linaker O.M. Effects of different interior decorations in the seclusion area of a psychiatric acute ward // *Nordic journal of psychiatry*. 2005. V. 59. № 1. P. 19–24.

REFERENCES

1. Antonovsky A. Breakdown: A needed fourth step in the conceptual armamentarium of modern medicine. *Social Science & Medicine*. 1972. V. 6. No. 5. Pp. 537–544.
2. Antonovsky A. Health, stress and coping. San Francisco: Jossey-Bass, 1979.
3. Antonovsky A. Unraveling the mystery of health: How people manage stress and stay well. San Francisco: Jossey-Bass, 1987.
4. Antonovsky A. The salutogenic model as a theory to guide health promotion. *Health Promotion International*. 1996. V. 11. No. 1. Pp. 11–18.
5. Beauchemin K.M., Hays P. Sunny hospital rooms expedite recovery from severe and refractory depressions. *Journal of Affective Disorders*. 1996. V. 40. No. 1–2. Pp. 49–51.
6. Beauchemin K.M., Hays P. Dying in the dark: sunshine, gender and outcomes in myocardial infarction. *Journal of the Royal Society of Medicine*. 1998. V. 91. No. 7. Pp. 352–354.
7. Bitterman N. Psychiatric ward dayroom: Human factors and design issues. World Health Congress. Brisbane: International Academy of Design and Health, 2013.
8. Calhoun J.B. Population density and social pathology. *California Medicine*. 1970. V. 113. No. 5. P. 54.
9. Changeux J.P., et al. Nicotinic acetylcholine receptors: From molecular biology to cognition. Odile Jacob Publishing Corp, 2005.
10. Rao M.L., et al. Blood serotonin, serum melatonin and light therapy in healthy subjects and in patients with nonseasonal depression. *Acta Psychiatrica Scandinavica*. 1992. V. 86. No. 2. Pp. 127–132.
11. Dancer S.J. How do we assess hospital cleaning? A proposal for microbiological standards for surface hygiene in hospitals. *Journal of Hospital Infection*. 2004. V. 56. No. 1. Pp. 10–15.
12. Dijkstra K., Pieterse M., Pruyn A. Physical environmental stimuli that turn healthcare facilities into healing environments through psychologically mediated effects. Systematic review. *Journal of Advanced Nursing*. 2006. V. 56. No. 2. Pp. 166–181.
13. Dilani A. A new paradigm of design and health in hospital planning. *World Hospitals and Health Services*. 2005. V. 41. No. 4. Pp. 17–21.
14. Rudd M., Vohs K.D., Aaker J. Awe expands people's perception of time, alters decision making, and enhances well-being. *Psychological Science*. 2012. V. 23. No. 10. Pp. 1130–1136.
15. Donne J. Emergency initiations and a few steps in my sick. London: Thomas Jones, 1624.
16. Floresco S.B., et al. Modulation of hippocampal and amygdalar-evoked activity of nucleus accumbens neurons by dopamine: Cellular mechanisms of input selection. *Journal of Neuroscience*. 2001. V. 21. No. 8. Pp. 2851–2860.

17. Salmivalli C. Feeling good about oneself, being bad to others? Remarks on self-esteem, hostility, and aggressive behavior. *Aggression and Violent Behavior*. 2001. V. 6. No. 4. Pp. 375–393.
18. Devlin A.S. Psychiatric ward renovation: Staff perception and patient behavior. *Environment and Behavior*. 1992. V. 24. No. 1. Pp. 66–84.
19. Golembiewski J.A. Start making sense: Applying a salutogenic model to architectural design for psychiatric care. *Facilities*. 2010. V. 28. No. 3–4. Pp. 100–117.
20. Golembiewski J.A., et al. Moving from theory to praxis on the fly: Introducing a salutogenic method to expedite mental health care provision in disaster situations. *The Australian Journal of Emergency Management*. 2012. V. 27. No. 2. Pp. 42.
21. Golembiewski J.A. Salutogenic architecture in healthcare settings. The handbook of salutogenesis. 2017. Pp. 267–276.
22. Golembiewski J.A. The architecture of the psychiatric milieu. *Facilities*. 2013.
23. Strümpfer D.J.W., Gouws J.F., Viviers M.R. Antonovsky's Sense of Coherence Scale related to negative and positive affectivity. *European Journal of Personality*. 1998. V. 12. No. 6. Pp. 457–480.
24. Le Hunte B., Golembiewski J. Stories have the power to save us: A neurological framework for the imperative to tell stories. *Arts and Social Sciences Journal*. 2014. V. 5. No. 2.
25. Golembiewski J.A. The designed environment and how it affects brain morphology and mental health. *Health Environments Research & Design Journal*. 2016. V. 9. No. 2. Pp. 161–171.
26. Howes O.D. et al. Midbrain dopamine function in schizophrenia and depression: a post-mortem and positron emission tomographic imaging study. *Brain*. 2013. V. 136. No. 11. Pp. 3242–3251.
27. Hurst L. The environment in chronic schizophrenia. *International Journal of Social Psychiatry*. 1960. V. 7. No. 1. Pp. 65–73.
28. Isovich E., et al. Social isolation after a single defeat reduces striatal dopamine transporter binding in rats. *European Journal of Neuroscience*. 2001. V. 13. No. 6. Pp. 1254–1256.
29. Strümpfer D.J.W., Viviers M.R., Gouws J.F. Item-phrasing in Antonovsky's sense of coherence scale related to negative and positive affectivity. *Personality and Individual Differences*. 1998. V. 24. No. 5. Pp. 669–675.
30. Koppiseti S., et al. Reactive oxygen species and the hypomotility of the gall bladder as targets for the treatment of gallstones with melatonin: a review. *Digestive Diseases and Sciences*. 2008. V. 53. No. 10. Pp. 2592–2603.
31. Lawton M.P., Nahemow L. Ecology and the aging process. 1973.
32. Le Hunte B., Golembiewski J. Stories have the power to save us: A neurological framework for the imperative to tell stories. *Arts and Social Sciences Journal*. 2014. V. 5. No. 2. Pp. 1–4.
33. Mittelmark M.B., Bull T. The salutogenic model of health in health promotion research. *Global Health Promotion*. 2013. V. 20. No. 2. Pp. 30–38.
34. Parker R. Health literacy: a challenge for American patients and their health care providers. *Health Promotion International*. 2000. V. 15. No. 4. Pp. 277–283.
35. Ulrich R.S. Effects of interior design on wellness: Theory and recent scientific research. *Journal of Health Care Interior Design*. 1991. V. 3. No. 1. Pp. 97–109.
36. Vaaler A.E., Morken G., Linaker O.M. Effects of different interior decorations in the seclusion area of a psychiatric acute ward. *Nordic Journal of Psychiatry*. 2005. V. 59. No. 1. Pp. 19–24.

Сведения об авторах

Громова Алёна Станиславовна, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, swampssun@gmail.com

Литвинова Ольга Геннадьевна, канд. ист. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, litvinova-olga1982@gmail.com

Authors Details

Alena S. Gromova, MSc, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, swampssun@gmail.com

Olga G. Litvinova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, litvinovaolga1982@gmail.com

УДК 711:721

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-24-32

*А.С. НИКОЛАЕВА, К.И. КОЛОДИН,
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет*

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРЫ ТУРИСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ В ЩАДЯЩЕМ РЕЖИМЕ ОСВОЕНИЯ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Основная цель исследования направлена на формирование подхода к щадящему туристско-рекреационному освоению оз. Байкал. Актуальность данной темы вызвана несколькими факторами: отсутствие достаточной теоретической базы по архитектуре региона, активное участие государства и наличие федеральных программ и проектных предложений, включающих в себя развитие туризма как важного социально-экономического направления; высокая степень загрязненности и постоянно ухудшающаяся экосистема озера.

Задачи исследования состоят в создании концепции (модели) щадящего режима туристско-рекреационного освоения Байкала, формировании подхода к выбору типа и принципам размещения объектов и их основным архитектурным и функциональным особенностям. Для этого авторами был проведен анализ и синтез данных федеральных целевых программ, литературных источников, а также методических, нормативных, проектных материалов по теме исследования.

В результате исследования авторами разработана схема щадящего режима туристско-рекреационного освоения, выявлены 4 зоны: усиленного, нормального, умеренного и перспективного щадящего освоения. Сформированы основные принципы размещения объектов, в основе которых лежит принцип мобильности и отнесения от береговой линии стационарных объектов, формирование центров научных исследований, отвечающих за постоянный мониторинг состояния экосистемы, выделение культовых и промысловых центров. Данные решения позволяют создать единую систему функционирования туристического кластера, интересные туристические маршруты и их архитектурно-функциональное разнообразие.

Ключевые слова: архитектура; градостроительство; туристические комплексы; щадящий режим; оз. Байкал.

Для цитирования: Николаева А.С., Колодин К.И. Принципы формирования архитектуры туристических комплексов в щадящем режиме освоения озера Байкал // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 24–32.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-24-32

*A.S. NIKOLAEVA, K.I. KOLODIN,
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*

SPARINGLY DEVELOPED TOURIST PLACES ON LAKE BAIKAL

The paper presents a sparing approach to the tourist and recreation development on Lake Baikal. This is conditioned by several factors: lack of sufficient theoretical basis on the regional architecture, the participation of the government, federal programs and projects on the development of tourism as an important socioeconomic sphere; high pollution and the constantly deteriorating ecosystem of the lake.

The aim of this work is to develop a concept (model) of sparingly developed tourist and recreation places on Lake Baikal, a choice of types and principles of placing objects and their main architectural and functional properties. The paper presents the analysis and synthesis of the data from the Federal Target Programs, literature, methodologies, regulatory and design materials on the problem.

As a result, the proposed model of sparingly developed tourist and recreation places includes intensive, normal, moderate and promising development. The main principles for the object placement are based on the mobility of stationary objects from the coastline, creation of research centers responsible for constant ecosystem monitoring, and traditional and fishing centers. These solutions allow creating the functioning system of the tourist cluster, interesting tourist routes and their architectural and functional diversity.

Keywords: architecture; urban planning; tourist places; sparing development; Lake Baikal.

For citation: Nikolaeva A.S., Kolodin K.I. Printsipy formirovaniya arkhitektury turisticheskikh kompleksov v shchadyashchem rezhime osvoeniya ozera Baikal [Sparingly developed tourist places on Lake Baikal]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 2. Pp. 24–32.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-24-32

Введение

Озеро Байкал притягивает к своим берегам туристов и отдыхающих со всего света. Туризм стал одним из важных экономических факторов Иркутской области, Республики Бурятия и Забайкальского края. Каждый из этих регионов создает свои пути и концепции по развитию данного направления в рамках государственных и федеральных целевых программ по развитию регионов и охране оз. Байкал.

Актуальность исследования и постановка проблем:

1. При большом количестве оценок экономических показателей, экологической ситуации архитектурный контекст данного вопроса остается без внимания: отсутствуют исследования и рекомендации по архитектурно-художественному формированию облика объектов, систематизированный подход к их размещению.

2. Разрозненные задачи развития региона, создания особых экономических зон не решают важную задачу развития Байкала как единого региона, привлекающего туристов всего мира, и формирования комфортной и привлекательной среды за пределами единой зоны или комплекса при бережном отношении к окружающей среде.

3. Активное развитие туристической среды регионов и целевые показатели определяют срочность изучения данной темы и формирование решения.

Исследование посвящено созданию щадящего подхода к развитию Прибайкалья, формированию общих принципов размещения зданий и типологии зданий, соответствующих им. Данный подход призван сократить антропогенную нагрузку на прибрежные территории, рассматривает возможности формирования единой транспортной сети, позволяющей быстро и комфортно перемещаться между ранее малодоступными регионами, и повышения туристической и рекреационной привлекательности удаленных от береговой линии территорий.

Методика исследования включила в себя анализ и синтез данных федеральных целевых программ по направлению исследования, изучение методи-

ческих, проектных нормативов, действующих градостроительных регламентов, литературных источников, научной литературы, зарубежного опыта функционирования туризма на охраняемых природных территориях и в уникальных ландшафтах, применение элементов системного анализа и формирования уникальной концепции.

Анализ литературных источников о Байкале показал наличие большого количества исследований последних лет по направлению биологии, геологии и геофизики, гидрологии, метеорологии, зоологии, химии, оптики атмосферы и океана, археологии, экономики. Данные исследования не освещают архитектурные аспекты, но могут быть применены при формировании центров мониторинга состояния озера в рамках единой концепции.

Отдельные источники освещают близкие по направленности исследования: принципы формирования архитектурно-градостроительной среды сельского экотуризма [1, 2], формообразование объектов загородной среды [3, 4], композиционные связи архитектурных форм и природного ландшафта [5], учет при проектировании существующего природного [6] и исторического [7, 8] контекстов, экологической архитектуры [9, 10], особенности формирования композиционно-эстетического облика [11–13], «зеленую» архитектуру [14, 15].

Принципы размещения и функциональной организации туристических комплексов

В результате анализа существующей туристической инфраструктуры, размещения объектов и основных туристических потоков были выявлены следующие особенности:

Стихийность – массовые потоки туристов бесконтрольно посещают популярные и доступные территории, такие как о. Ольхон, Листвянка, Слюдянка, Малое море.

Загрязненность береговой линии – в связи со стихийным посещением и привлекательностью побережий для туристов состояние экосистемы береговой линии стремительно ухудшается, происходит стихийное строительство баз отдыха для туристов, гостевых домов, популярны также кемпинги и даже автостоянки у воды.

Отсутствие комплексного подхода к выбору типов объектов и архитектуры – выбор типов объектов инфраструктуры туризма для нового строительства подчинен локальным задачам: повышение потока туристов, размещение объектов в самых популярных для посетителей зонах. Эта особенность влечет за собой невозможность формирования единой эффективной инфраструктуры и еще больше перегружает зоны повышенного антропогенного воздействия.

Эти особенности указывают на высокую степень негативного воздействия на побережье и акваторию, стремительное ухудшение состояния озера в будущем и требуют немедленной корректировки.

Для решения данной задачи были сформированы принципы размещения туристических комплексов.

Принцип контроля – контроль посещения различных районов и оценка антропогенной нагрузки.

Принцип перераспределения – переформирование потоков туристов за счет единой созданной структуры, возможность регулировать потоки. Раз-

грузка прибрежных посещений и ограничение возможности посещения зон. Наиболее эффективен в мировой практике «челночный» метод посещения – организованные выезды на привлекательные для туристов территории из более удаленных мест.

Принцип полифункциональности – создание туристических комплексов, включающих дополнительные функции в зависимости от их места расположения: научную, общественно-деловую, промышленную, лечебно-оздоровительную и пр. Это позволит повысить привлекательность объектов для туристов, обеспечить рабочими местами местное население.

Принцип доступности – создание единой транспортной сети, обеспечивающей комфортный доступ к различным объектам.

Схема щадящего туристско-рекреационного освоения оз. Байкал

Для реализации данных принципов была разработана схема щадящего туристско-рекреационного освоения оз. Байкал (рис. 1).

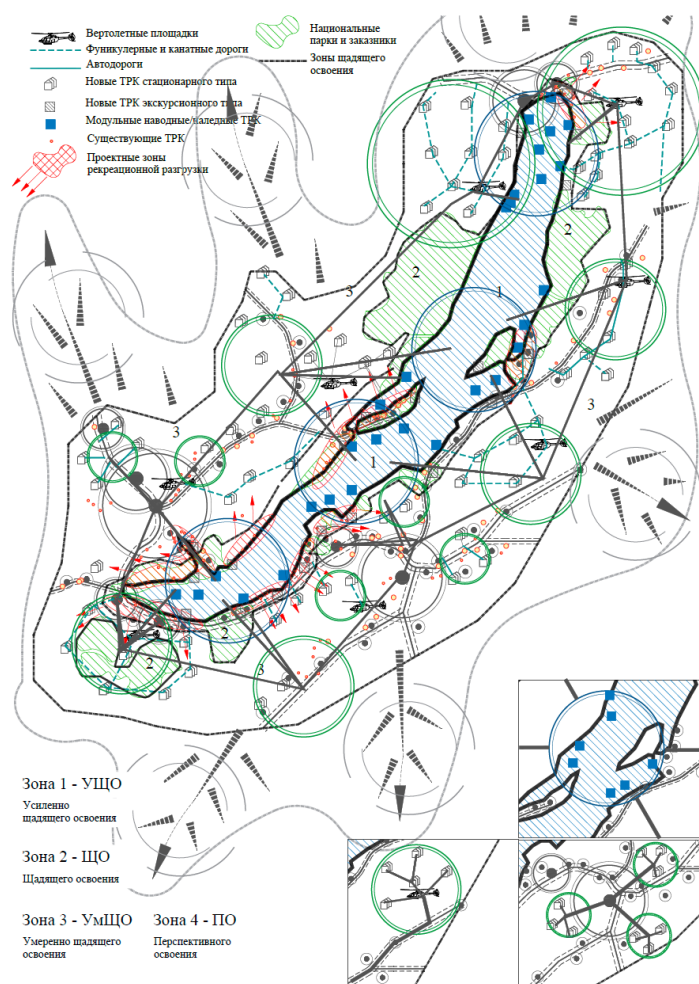


Рис. 1. Схема щадящего туристско-рекреационного освоения оз. Байкал

Схема предусматривает формирование четырех зон:

– *зона 1: усиленно щадящего освоения* – включает в себя территории, подверженные наибольшему антропогенному воздействию, часть береговой линии (где выделены перспективные зоны рекреационной разгрузки), а также непосредственно акваторию;

– *зона 2: щадящего освоения* – включает в себя также зоны высокого антропогенного воздействия, находящиеся вблизи акватории, а также национальные парки и заказники;

– *зона 3: умеренно щадящего освоения* – зоны, находящиеся в удалении от береговой линии, наиболее перспективны для размещения стационарных туристических объектов продолжительного пребывания;

– *зона 4: перспективного освоения* – менее привлекательна для туристов из-за удаленности, однако является зоной перспективного размещения промысловых центров, контактных ферм.

Для решения вопроса размещения и типов объектов и функций на территории были созданы рекомендации (таблица) по размещению новых Байкальских туристско-рекреационных комплексов (БТРК), включающие в себя разделение объектов на стационарные и нестационарные, а также рекомендации по размещению комплексов в различных зонах щадящего освоения.

Рекомендации по размещению типов БТРК

Новый тип БТРК		Зона 1 УЩО	Зона 2 ЩО	Зона 3 УмЩО	Зона 4 ПО
Стационарные	Промысловый				
	Научно-исследовательский				
	Общественно-деловой				
	Лечебно-оздоровительный				
	Культовый				
	Полифункциональный				
	Экскурсионный				
Нестационарные	Мобильный				
	Передвижной				

Выделены следующие типы БТРК:

– *промысловый* – опорной функцией является производство, ремесло, туристическая функция данных комплексов дает возможность изучать ремесло и взаимодействовать с процессом и результатом производства, включают в себя охотничий, рыболовный туризм, контактные фермы, ремесленные практики;

– *научно-исследовательский* – центры научных исследований, центры экологической и архитектурной экспертизы, центры мониторинга состояния озера особенно целесообразны при строительстве на прибрежных и особо охраняемых природных территориях;

– *общественно-деловой* – опорная функция – общественная: центры горнолыжного спорта, деловых мероприятий, проведение конференций и слетов;

– *лечебно-оздоровительный* – опорная рекреационная функция с включением лечебно-оздоровительного блока, такие объекты могут находиться в удалении от акватории, но тяготеть к живописным лесополосам и горячим источникам;

– *культурный* – центры развития и презентации культуры Прибайкалья и религиозных верований, центры паломничества, центры религиозного туризма. Этнические особенности территории позволяют не только использовать известные сложившиеся постройки и места для посещения, но также создавать *искусственные центры*, основанные на воспроизведении архитектуры и культуры тех или иных народностей, что позволит создать «принудительный спрос» на ранее менее привлекательные территории;

– *полифункциональный* – включает несколько опорных функций с учетом фактора антропогенеза и среды (например, спортивный, охотничий, рыболовный, экологический туризм);

– *экскурсионный* – предназначен для временного пребывания людей (только на время экскурсии (от 1–2 ч до 1–2 сут);

– *мобильный* – сезонные объекты наводного, наледного, навесного, сборно-разборного типа;

– *передвижной* – капсульные автобусы, судоходные отели.

Наиболее эффективное функционирование предложенной схемы возможно только при комплексном подходе к организации непосредственно туристических маршрутов с возможностью посещения различных мест в ограниченное время. Важным фактором в данном вопросе является транспортная доступность объектов.

Озеро Байкал является уникальным: протяженность озера, наличие труднодоступных участков не позволяют сформировать систему автодорог, обеспечивающих доступ к различным точкам. На озере действует система водного сообщения, которая может быть адаптирована для туристических целей.

К существующим типам перемещения следует также добавить вертолетный транспорт, который позволит решить вопрос невозможности пересечь длительные расстояния за короткий промежуток времени. Соответственно схема размещения объектов должна иметь узловую структуру, связанную транспортным сообщением – автомобильным, водным и вертолетным транспортом на удаленные расстояния, для сообщения между близлежащими комплексами целесообразно использование фуникулеров.

Заключение

В последние годы в России растет динамика развития туризма на Байкале, целевые показатели определяются федеральными программами РФ, привлекательность Байкала возросла также в условиях ограниченного перемещения между странами в 2020 г. При условии роста количества посетителей и мероприятий по их привлечению необходимо формирование комплексного подхода к развитию территории, объединяющего части Прибайкалья, принадлежащие Иркутской области, Республике Бурятия, Забайкальскому краю, а также акватории озера в единый туристско-рекреационный кластер, работающий по одним законам и позволяющий управлять потоками туристов, отслеживать состояние отрасли и территории, а также развивать ее.

Озеро, подверженное антропогенным нагрузкам, требует щадящего подхода. Формирование схемы щадящего туристско-рекреационного освоения территории позволяет систематизировать подход к выбору и размещению объектов отдыха и туризма, выбрать подходящую функцию и сделать объект более привлекательным для туристов, разгрузить прибрежные территории. Предложенная схема и рекомендации к размещению типов объектов могут быть использованы как основа для градостроительных регламентов и проектных предложений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиков С.В., Осина В.Л. Агротуризм как фактор устойчивого развития территории на примере Новошешминского района Республики Татарстан // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 6. С. 40–50.
2. Минязова А.Б., Айдарова Г.Н. Подходы и принципы формирования архитектурно-градостроительной среды сельского экотуризма в Тоскане // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 1 (47). С. 121–129.
3. Колодин К.И. Формообразование объектов загородной среды. Москва : Архитектура-С, 2004. 256 с.
4. Колодин К.И. Интерьер загородной улицы. Москва : Архитектура-С, 2015. 416 с.
5. Курбатов Ю.И. Архитектурные формы и природный ландшафт: композиционные связи. Ленинград : Изд-во Ленинград. ун-та, 1988. 134 с.
6. Abeer Makram. Nature-Based Framework for Sustainable Architectural Design – Biomimetic Design and Biophilic Design // Architecture Research. 2019. № 9 (3). P. 74–81.
7. Akyıldız N.A., Olğun T.N. Investigation for Energy Use and Conservation of Sustainable Traditional Architecture: Case of Malatya/Turkey Bahri Mosque // Architecture Research. 2020. № 10 (2). P. 60–67.
8. Asaad Ali Suleiman Abou Ghazala. Rehabilitation of Villages and Heritage Sites with the Integration of Cinematic Environment for Urban Heritage Sustainability in Saudi Arabia // Architecture Research. 2020. № 10 (3). P. 85–92.
9. Masita Hanjayani, Nelson M. Siahaan. Hatinggian Eco-Park Hotel Resort (Ecological Architecture) // International Journal of Architecture and Urbanism. 2020. № 4 (3). P. 291–299.
10. Atifah N Tarigan, Morida Siagian. Ulos Weaving Center (Neo Vernacular Architecture) // International Journal of Architecture and Urbanism. 2020. № 4 (3). P. 281–290.
11. Николаева А.С. Особенности формирования композиционно-эстетического облика туристических комплексов на Байкале // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 6. С. 83–89.
12. Колодин К.И. Особенности архитектурно-планировочной организации и формообразования объектов поселений, расположенных вблизи водоемов // Новые идеи нового века. 2016. Т. 2. С. 141–145.
13. Harea O., Eplenyi A. Viticultural Land-landscape Patterns – Embedding contemporary wineries into the landscape site // Scientific Journal of Latvia University of Agriculture. Landscape Architecture and Art. 2017. V. 10. № 10. P. 7–14.

14. Ильвицкая С.В. «Зелёная» архитектура // Архитектура и строительство России. 2018. № 1. С. 118–120.
15. Ильвицкая С.В., Лобкова, Т.В. Архитектура заглубленных зданий – перспективное направление «зеленого» строительства // ACADEMIA. Архитектура и строительство. 2019. № 4. С. 127–133.

REFERENCES

1. Novikov S.V., Osina V.L. Agroturizm kak faktor ustoichivogo razvitiya territorii Novosheshminskogo raiona Respubliki Tatarstan [Rural tourism as a factor of sustainable development of the Novosheshminsky region in Tatarstan]. *Vestnik Tomskego gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020. V. 22. No. 6. Pp. 40–50. (rus)
2. Minyazova A.B., Aidarova G.N. Podkhody i printsipy formirovaniya arkhitekturnogradostroitel'noi sredy sel'skogo ekoturizma v Toskane [Approaches to architectural and urban environment for rural ecotourism in Tuscany]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2019. No. 1 (47). Pp. 121–129. (rus)
3. Kolodin K.I. Formoobrazovanie ob'ektov zagorodnoj sredy [Formation of country environment objects]. Moscow: Arkhitektura-S. 2004. 256 p. (rus)
4. Kolodin K.I. Inter'er zagorodnoj ulicy [Country street interior]. Moscow: Arkhitektura-S. 2015. 416 p. (rus)
5. Kurbatov Yu.I. Arhitekturnye formy i prirodnyj landshaft: kompozitsionnye svyazi [Architectural forms and natural landscape: composite communication]. Leningrad, 1988. 134 p. (rus)
6. Abeer Makram. Nature-based framework for sustainable architectural design – biomimetic design and biophilic design. *Architecture Research*. 2019. No. 9 (3). Pp. 74–81.
7. Akyıldız N.A., Olğun T.N. Investigation for energy use and conservation of sustainable traditional architecture: Case of Malatya/Turkey Bahri Mosque. *Architecture Research*. 2020. No. 10 (2). Pp. 60–67.
8. Asaad Ali Suleiman Abou Ghazala. Rehabilitation of villages and heritage sites with the integration of cinematic environment for urban heritage sustainability in Saudi Arabia. *Architecture Research*. 2020. No. 10 (3). Pp. 85–92.
9. Masita Hanjayani, Siahaan N.M. Hatinggian Eco-Park Hotel Resort (ecological architecture). *International Journal of Architecture and Urbanism*. 2020. No. 4 (3). Pp. 291–299.
10. Atifah N. Tarigan, Morida Siagian. Ulos Weaving Center (Neo Vernacular architecture). *International Journal of Architecture and Urbanism*. 2020. No. 4 (3). Pp. 281–290.
11. Nikolaeva A.S. Osobennosti formirovaniya kompozitsionno-esteticheskogo oblika turistskikh kompleksov na Baikale [Composition and aesthetic image of tourist places on Baikal]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2019. No. 6. Pp. 83–89.
12. Kolodin K.I. Osobennosti arhitekturno-planirovochnoj organizatsii i formo-obrazovaniya ob'ektov poselenij, raspolozhennykh vblizi vodoemov [Architectural and planning of settlements near waters]. *Novye idei novogo veka*. 2016. V. 2. Pp. 141–145. (rus)
13. Harea O., Eplenyi A. Viticultural landscape patterns – embedding contemporary wineries into the landscape site. *Scientific Journal of Latvia University of Agriculture. Landscape Architecture and Art*. 2017. V. 10. No. 10. Pp. 7–14.
14. Il'vickaya S.V., Kukushkina L.A., Kukushkin A.E. Zelenaya arhitektura [Green architecture]. *Arhitektura i stroitel'stvo Rossii*. 2018. No. 1. Pp. 118–120. (rus)
15. Il'vitskaya S.V., Lobkova, T.V. Arkhitektura zaglublennykh zdaniy – perspektivnoe napravlenie «zelenogo» stroitel'stva [Architecture of embedded buildings as a perspective direction of green construction]. *ACADEMIA. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2019. No. 4. Pp. 127–133. (rus)

Сведения об авторах

Николаева Анна Сергеевна, аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4, 9207710@gmail.com

Колодин Константин Иванович, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4, kolodinstudio@bk.ru

Authors Details

Anna S. Nikolaeva, Research Assistant, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, St.-Petersburg, Russia, 9207710@gmail.com

Konstantin I. Kolodin, A/Professor, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, St.-Petersburg, Russia, kolodinstudio@bk.ru

УДК 711.47

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-33-45

С.С. ЕГОРОВА, Ю.А. ЗАКИРОВА,

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

ГРАДОСТРОИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ В СТРУКТУРЕ КАЗАНСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

Актуальность исследования обусловлена тем, что формирование и развитие человеческого капитала определяется уровнем образования населения, качеством высшего и среднего специального образования. Происходят изменения в социальной, экономической, технологической, информационной областях, что требует соответствующей территориальной организации объектов высшего и среднего специального образования, а именно формирования образовательных кластеров различного профиля.

Цель исследования – разработка концепции пространственно-планировочной организации образовательного кластера в Казанской агломерации, определение его специфики и профиля с учетом социально-экономических предпосылок развития территории.

Материалами исследования выступали документы стратегического и территориального планирования различного масштабного уровня, материалы натурного анализа. Был проведен анализ и систематизация данных на основе изучения литературных источников, отечественного и зарубежного опыта проектирования образовательных кластеров, современных тенденций архитектурно-пространственной организации кампусов.

В результате исследования разработана градостроительная модель формирования образовательного кластера сельскохозяйственной специализации на территории Верхнеуслонского муниципального района и сформировано предложение по архитектурно-планировочной организации его ядра – агрокампуса в г. Иннополисе. Формирование образовательного кластера агропрофиля на территории Верхнеуслонского муниципального района создаст новую точку роста Казанской агломерации. Такое решение направлено на преобразование сложившейся моноцентричной планировочной структуры Казанской агломерации. Размещение ядра образовательного кластера на территории Иннополиса позволит городу усилить градообразующую базу, будет способствовать его социально-экономическому развитию. Выявленные принципы размещения и формирования образовательных кластеров, архитектурно-градостроительные подходы к организации территории кампуса могут быть использованы для формирования других профильных образовательных кластеров в Республике Татарстан.

Ключевые слова: Казанская агломерация; образовательный кластер; кампус; Иннополис; аграрный университет.

Для цитирования: Егорова С.С., Закирова Ю.А. Градостроительная модель формирования образовательного кластера сельскохозяйственной специализации в структуре Казанской агломерации // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 33–45.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-33-45

S.S. EGOROVA, Yu.A. ZAKIROVA,

Kazan State University of Architecture and Engineering

CITY PLANNING MODEL OF EDUCATIONAL AGRICULTURAL CLUSTER IN KAZAN URBAN AGGLOMERATION

The study concerns the formation of human capital determined by the level of education, the quality of higher and secondary special education. Changes in social, economic, technolo-

gical, and information fields require the territorial organization of higher and secondary special educational objects, namely, the formation of educational clusters of various profiles. The purpose of the study is to develop the concept of the city planning of the educational cluster in the Kazan urban agglomeration, determine its specifics and profile, taking into account the socio-economic prerequisites for the territory development. Research is based on the documents of strategic and territorial planning of various large-scale levels, the field analysis. The data analysis and systematization are based on the literature in the field, Russian and foreign experience in the design of educational clusters, modern trends in the architectural and spatial organization of campuses. The proposed urban planning model for the formation of the agricultural educational cluster on the territory of the Verkhneuslonsky municipal district and the architectural and planning organization of its center in Innopolis.

The formation of this cluster on the territory of the Verkhneuslonsky municipal district will provide the growth in the Kazan agglomeration. This decision is aimed at transforming the existing monocentric planning structure of the Kazan agglomeration. The center of the educational cluster in Innopolis will allow the city to strengthen the city-forming base, contribute to its socio-economic development. The identified principles of the educational cluster, architectural and urban planning approaches to the organization of the campus can be used to organize other specialized educational clusters in the Republic of Tatarstan.

Keyword: Kazan urban agglomeration; educational cluster; campus; Innopolis; agricultural University.

For citation: Egorova S.S., Zakirova Yu.A. Gradostroitel'naya model formirovaniya obrazovatel'nogo klastera sel'skokhozyaistvennoi spetsializatsii v strukture Kazanskoi aglomeratsii [City planning model of educational agricultural cluster in Kazan urban agglomeration]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturo-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 2. Pp. 33–45. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-33-45

Введение

Формирование и развитие человеческого капитала – одна из приоритетных сфер социально-экономического развития в России сегодня. Во многом формирование человеческого капитала определяется уровнем образования населения, качеством высшего и среднего специального образования. Развитие образовательных организаций является одним из главных направлений социально-экономического развития агломераций, заложенных в федеральные стратегические и программные документы, в программы, стратегии и концепции на уровне субъектов РФ и соответствующих муниципалитетов. Изменения в системе организации объектов высшего и среднего специального образования проходят во многих субъектах Российской Федерации, в том числе и в Республике Татарстан. На территории региона действует Государственная программа «Развитие образования и науки Республики Татарстан на 2014–2025 годы», основной целью которой является модернизация региональной системы профессионального образования. Согласно Стратегии социально-экономического развития Республики Татарстан на период до 2030 г., создание глобального конкурентоспособного устойчивого региона является стратегической целью. Также отмечается необходимость повышения качества образования, изменения условий труда и возможностей широкого использования информационно-коммуникационных технологий¹.

¹ Министерство экономики Республики Татарстан : [официальный сайт]. URL: <https://mert.tatarstan.ru/strategiya-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya.htm> (дата обращения: 25.10.2020).

В настоящее время во многих странах прослеживается направление развития объектов образования во взаимосвязи с бизнес-структурами. Инновационные образовательные кластеры широко распространены в США, Франции, Нидерландах, Японии, Германии, Китае. В современной российской практике также можно наблюдать процесс формирования новых территориальных образовательных кластеров, развитие образовательных кластеров на базе уже исторически сложившихся вузов. Среди российских исследований есть ряд научных публикаций по экономике [1, 2], педагогике [3, 4], региональному управлению [5, 6] в области создания отраслевых территориальных кластеров. Вместе с тем теоретическая база создания образовательных территориальных кластеров недостаточно систематизирована и согласована, что затрудняет процесс их исследования. Наблюдается пробел в направлении территориального, пространственного формирования и развития образовательных кластеров. Отсутствие общей описательной модели с точки зрения территориально-пространственной организации образовательного кластера затрудняет процесс его создания, развития, финансирования.

Объектом исследования является образовательный кластер.

Используя терминологию М. Портера [7], образовательный кластер формируется при наборе критической массы отраслевых объектов (высших учебных заведений, промышленных компаний, технопарков и бизнес-инкубаторов, научно-исследовательских центров и лабораторий), социальных институтов, органов государственного управления на определенной локальной территории [7, 8]. Основная миссия кластера – обеспечение условий, способствующих быстрой и эффективной передаче исследований и внедрению разработок из лабораторий в бизнес и производство. По вопросам кластерного образования рассмотрены труды М. Портера [7, 9], а также ряд работ российских исследователей [10–12]. Изучены подходы к созданию и развитию моделей промышленных и образовательных кластеров агропрофиля [13, 14]. Рассмотрены работы по вопросам формирования среды студенческого кампуса, российский [15–17] и зарубежный опыт [18, 19].

Целью исследования является разработка концепции пространственно-планировочной организации образовательного сельскохозяйственного кластера в Казанской агломерации.

Для достижения указанной цели были определены следующие задачи:

- 1) изучить социальные, экономические и исторические предпосылки формирования образовательных кластеров;
- 2) выявить особенности градостроительного развития объектов высшего и среднего специального образования в Казанской агломерации, определить типологические модели городских кампусов г. Казани;
- 3) апробировать направление кластерного развития системы объектов высшего и среднего специального образования на территории Казанской агломерации.

Материалы и методы

В исследовании применены следующие методы:

- анализ и систематизация данных на основе литературных источников, изучение отечественного и зарубежного опыта проектирования образователь-

ных кластеров, изучение современных тенденций архитектурно-пространственной организации кампусов;

– метод функционально-пространственного моделирования при выявлении типологических моделей образовательных кампусов и кластеров в границах Казанской агломерации;

– комплексное натурное и дистанционное исследование объектов высшего и среднего образования по архитектурно-планировочным, градостроительным, функциональным характеристикам.

Материалами для исследования стали документы стратегического и территориального планирования² федерального уровня «Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 г.». Изучены также «Стратегия социально-экономического развития РТ-2030», программа «Развитие образования и науки Республики Татарстан на 2014–2025 гг.», «Стратегия социально-экономического развития города Казани до 2030». Также материалами исследования являются документы территориального планирования: «Схема территориального планирования Верхнеуслонского муниципального района», «Генеральный план г. Иннополис», «Генеральный план МО г. Казань». Проведено натурное исследование территории Верхнеуслонского муниципального района и г. Иннополиса. Также рассмотрены отраслевые своды правил: СП 251.1325800.2016 «Здания общеобразовательных организаций. Правила проектирования», СП 278.1325800.2016 «Здания образовательных организаций высшего образования. Правила проектирования», СП 348.1325800.2017 «Индустриальные парки и промышленные кластеры. Правила проектирования», СП 450.1325800.2019 «Агропромышленные кластеры. Правила проектирования» и др.

Результаты

На основе изучения и анализа мирового опыта формирования инновационных образовательных кластеров выделены следующие принципы размещения и формирования образовательных кластеров:

– принцип локализации на существующей образовательной базе высшего уровня (вуз, научно-исследовательские центры и т. п.);

– принцип транспортной доступности заключается в обеспечении связности между участниками образовательного кластера;

– социально-экономический принцип заключается в обеспеченности человеческими, производственными, транспортными ресурсами, наличии в регионе активной инновационной, социально-экономической деятельности;

– принцип профильности заключается в выраженной специализации, наличии или возможности размещения предприятий одной отрасли, концентрирующихся на локальной территории;

– принцип «экологичности» заключается в размещении на территории с благоприятными климатическими, природными, экологическими характеристиками.

² Документы стратегического и территориального планирования доступны на сайте Федеральной государственной информационной системы территориального планирования. URL: <https://fgistp.economy.gov.ru/>

Как показал мировой опыт кластерного развития объектов образования, универсальная модель образовательного кластера включает в себя пять сфер, создающих цепочку «образование – наука – бизнес – организационные группы».

Предлагается следующая методика пространственно-территориального формирования инновационных образовательных кластеров:

1. Выявление ресурсов территории, пофакторный анализ и обоснование создания и развития образовательного кластера. Определение профильности, возможных участников, формирование состава образовательного кластера. Формирование стратегии, концепции развития, вероятных границ кластера.

2. Определение ядра образовательного кластера и его месторасположения. Определение приоритетных направлений организации производства, связанных с направлением образования, площадок для их размещения.

3. Формирование организационно-управленческой модели деятельности образовательного кластера. Определение участников кластера, развивающих и дополняющих деятельность и специфику ядра (кампуса), развитие связей между участниками кластера.

4. Развитие сервисных структур образовательного кластера, направленных на обеспечение его полноценного функционирования. Окончательное определение границы образовательного кластера.

На территории Казани находится более 30 вузов. Был проведен анализ размещения вузов на территории Казани и Казанской агломерации. Выявлено, что значительная часть объектов высшего образования расположена в Вахитовском районе г. Казани. Такое размещение, обусловленное историческим развитием планировочной структуры города, сдерживает и ограничивает развитие ряда отраслевых вузов сегодня. Анализ территорий вузов Казани (КФУ, КНИТУ, КГАСУ, КГЭУ и др.), их функционального состава, площади, размещения в городе показал, что это кампусы городского распределенного типа. Отличительным является кампус КГАСУ, практически все учебные корпуса которого, общежития, лаборатории и научно-образовательные центры территориально расположены близко. Казанский государственный аграрный университет (КГАУ) имеет кампус городского распределенного типа. Образовательные площадки КГАУ находятся в разных административных районах города. Агрономический факультет КГАУ размещен на территории Фермы-2 (Приволжский район), факультет лесного хозяйства и экологии размещен в п. Дербышки (Советский район), а на территории Вахитовского района расположены Институт экономики и руководство вуза. Итак, выделены следующие характеристики территориальной организации КГАУ, которые могут сдерживать развитие вуза: 1) отдаленное размещение корпусов; 2) территории и здания находятся не в собственности университета; 3) территория, ранее отведенная под агрономический факультет, понесла значительный урон в связи с тем, что часть ранее арендованных земельных участков, на которых размещались научно-опытные поля, были изъяты под жилую застройку. Исходя из этого, ряд специальностей данного университета нуждаются в дополнительных площадях, а также требуется создание возможностей для внедрения новых технологий.

На сегодняшний день Республика Татарстан имеет обширную производственную базу и территориальные ресурсы для развития сельского хозяй-

ства. Данное направление является перспективным в регионе. Имеется большое количество пахотных земель и ресурсов для поддержания этого направления. Развитие отрасли сельского хозяйства требует внедрения новых современных технологий и подготовки высококвалифицированных кадров аграрной специализации.

Был проведен комплексный анализ территории в границах Казанской агломерации на предмет возможности формирования и развития научно-образовательного кластера аграрного профиля. В состав Казанской агломерации входят г. Казань и муниципальные районы: Верхнеуслонский, Высокогорский, Зеленодольский, Лаишевский, Пестречинский. Рассматривались территориальные, природно-географические ресурсы, экологические характеристики территорий. При выборе территории для формирования и развития образовательного кластера важным фактором является наличие урбанизированной территории и связь с ядром Казанской агломерации.

В 2012 г. в границах Казанской агломерации был построен «новый город» Иннополис. Город задумывался как наукоград с IT-профилем. Иннополис – это самый молодой город, построенный на постсоветском пространстве. На его территории было заложено 192,71 га для особой экономической зоны, предназначенной для размещения офисов компаний-резидентов и лабораторий для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. В городе был построен АНО ВО «Университет Иннополис» (автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис»), специализирующийся на образовании и научных исследованиях в области современных информационных технологий (компьютерные науки, теоретические основы компьютерных наук, управление разработкой ПО, разработка безопасных сетей и систем, управление большими данными, робототехника и компьютерное зрение). На сегодняшний день, согласно данным с официального сайта Университета Иннополис, в вузе обучается 804 студента. Перспективная численность студентов университета – 5000 чел. В состав университета входят учебно-исследовательский корпус общей площадью 23 000 м², студенческие кампусы общей площадью 40 000 м² и спортивный корпус площадью 7530 м².

Зарубежный опыт показывает положительную динамику в синергии IT-технологий и сельского хозяйства. Развитие агропромышленного комплекса в современных технологических условиях становится более многообразным и высокотехнологичным – это внедрение новейших технологий в области селекции и обработки почв, использование биотехнологий, автоматизация переработки и логистики, управление фермами, анализ больших данных, собранных с метеостанций, датчиков в полях, спутников, дронов и пр. Таким образом, специализация Иннополиса, наличие незастроенных территориальных резервов, предназначенных для размещения объектов образовательного профиля, создают предпосылки для развития научного образовательного кластера и размещения на его территории кампуса агропрофиля.

Город Иннополис расположен на территории Верхнеуслонского муниципального района. Для дальнейшего обоснования, размещения и развития научно-образовательного кластера с аграрным уклоном была проанализиро-

вана территория Верхнеуслонского района. Площадь территории района – 1302,82 км², численность постоянного населения на 2020 г. составляет 15 935 чел³. Административным центром района является с. Верхний Услон, численность населения – 5085 чел. Территория Верхнеуслонского муниципального района ограничена с севера и востока берегом Куйбышевского водохранилища (р. Волга), на западе – руслом р. Свияги, на юге граница проходит по водоразделу рек Сулицы, Мордовки и Киярмети.

Экономика Верхнеуслонского муниципального района представлена в значительной степени сельским хозяйством, лесной промышленностью, тяжелым машиностроением, пищевой, мукомольно-крупяной, комбикормовой промышленностью, добычей нерудных полезных ископаемых, промышленностью строительных материалов. Ведущими отраслями сельского хозяйства являются молочное и мясное животноводство, выращивание зерновых и кормовых культур. Сельскохозяйственную отрасль представляют 7 сельхозпредприятий, из них 4 крупных («КВ-Агро», ООО АФ «Услон», предприятие «Заря», подразделение «Шеланга») и 87 крестьянско-фермерских хозяйств. В их пользовании находится 72,0 тыс. га сельскохозяйственных угодий, в том числе 55,5 тыс. га пашни. Также промышленность района представлена предприятиями: двумя кирпичными заводами: ООО «Керамика-Синтез» (с. Шеланга) и филиал ЗАО «ФОН»-«Ключищинская керамика», филиал ОАО «Булочно-кондитерский комбинат», филиал ОАО «Вамин Татарстан»-«Печищинский КХП», филиал ОАО Тростовая компания «Татагрохимсервис», Матюшинский карьер по добыче щебня и известковой муки, молочный завод ООО Агрофирма «Верхний Услон», ОАО «Плодово-ягодный совхоз «Шеланговский», Кураловское подразделение по производству квасного сусли и патоки мальтозной ОАО «Таткрахмалпатока» (с. Куралово), ООО «Дивный берег» по производству рыбной продукции, ГБУ «Приволжсклес», ООО «Вельветто марин», консервный завод ООО «Партнер».

Инфраструктурный сектор экономики Верхнеуслонского муниципального района достаточно развит. В настоящее время туристско-рекреационная сфера Верхнеуслонского района находится на стадии интенсивного развития, что в первую очередь связано с наличием привлекательных для туристов и отдыхающих объектов: горнолыжный спортивно-оздоровительный комплекс «Казань», гольф-клуб «Гольф Казань», комплекс стендовой стрельбы, 4 детских оздоровительных лагеря и 3 дома отдыха, а также богатые природные ресурсы (р. Волга, р. Свияга, холмистая местность).

Верхнеуслонский район отличается высоким транспортно-коммуникационным потенциалом. По территории района проходят основные транспортные коридоры республики, посредством которых осуществляются как межрайонные (внутриреспубликанские), так и внешние связи республики с другими регионами Российской Федерации. Район в северной части пересекает федеральная автомобильная дорога М-7 «Волга», по срединной части района проходит федеральная автомобильная дорога РР-241. Согласно стратегическим до-

³ Численность населения указана согласно данным Федеральной службы государственной статистики на начало 2020 г. URL: <https://rosstat.gov.ru/>

кументам и схемам территориального планирования, наличие через р. Волгу только одного моста, отсутствие дублёра снижают надёжность связей с регионами страны, расположенными на западе. С целью совершенствования межрайонных связей в схемах территориального планирования республики и Лаишевского района предлагается строительство моста в районе населённого пункта Троицкий, а также развитие дорожной сети районов, прилегающих к городу и формирующих Казанскую агломерацию (СТП Верхнеуслонского, Высокогорского, Зеленодольского, Лаишевского, Пестречинского районов).

Современная природно-экологическая ситуация Верхнеуслонского муниципального района определяется как благоприятная. Но также отмечаются загрязнения окружающей среды, связанные с наличием промышленных и сельскохозяйственных предприятий, использованием пестицидов в сельском хозяйстве, высоким процентом распашки и смываемости почв и др.⁴ Таким образом, территория Верхнеуслонского района и его ресурсная база соответствуют размещению и развитию научно-образовательного кластера с аграрным профилем. Наличие на территории муниципального района г. Иннополиса, его специализация также послужили обоснованием размещения сельскохозяйственного образовательного кластера, а также ядра кластера – кампуса. Согласно проектной концепции и анализу существующих вузов Казани и Казанской агломерации, кампус может быть сформирован несколькими вариантами: 1) как самостоятельный новый вуз аграрного профиля; 2) как развитие существующего университета г. Иннополиса; 3) на базе Казанского государственного аграрного университета (КГАУ). Последний вариант предполагает, что в проектом агрокампусе на территории г. Иннополиса разместится три факультета КГАУ: агрономический факультет, факультет лесного хозяйства и экологии, институт механизации и технического сервиса, который был образован в 2007 г. на базе факультетов механизации сельского хозяйства и технического сервиса. Также в границах кампуса предлагается разместить спортивные, инфраструктурные объекты, жилые дома для обучающихся, сотрудников и преподавателей. Органы управления КГАУ, ряд структурных подразделений, Институт экономики предполагается оставить в черте г. Казани в центральном здании на ул. Карла Маркса.

Проектная модель образовательного сельскохозяйственного кластера на территории Верхнеуслонского района включает пять структурных элементов (таблица).

Для размещения агрокампуса на территории г. Иннополиса рассмотрены незастроенные земельные участки общей площадью 42,2 га, согласно ПЗЗ⁵ относящиеся к зоне Д1 – зона делового, общественного и коммерческого назначения. Для данной зоны одним из основных видов разрешенного использования

⁴ Согласно данным действующей и утвержденной в 2016 г. Схемы территориального планирования Верхнеуслонского муниципального района (Текстовые материалы по обоснованию. Т. 2. Кн. 1. Социально-экономическое и территориально-пространственное развитие), данные размещены на сайте Федеральной государственной информационной системы территориального планирования. URL: <https://fgistp.economy.gov.ru/>

⁵ Правила землепользования и застройки муниципального образования «Город Иннополис» Верхнеуслонского муниципального района Республики Татарстан, утверждены в 2015 г., данные размещены на сайте Федеральной государственной информационной системы территориального планирования. URL: <https://fgistp.economy.gov.ru/>

земельных участков и объектов капитального строительства является «Образование», т. е. размещение высших учебных заведений, отделений, факультетов, филиалов высших и средних специальных учебных заведений, многофункциональных досуговых объектов (для досуговых занятий детей, подростков, молодежи, взрослых), научно-исследовательских и изыскательских организаций, не требующих создания санитарно-защитной зоны. Согласно концепции общая площадь агрокампуса составляет 42,2 га. В проектной концепции выделены функциональные блоки: научно-образовательный, жилой, научно-исследовательский инновационный центр, зона размещения административных и обслуживающих объектов, зона агробиотехнопарка, научно-опытные поля (площадью около 25 га). При разработке мастер-плана агрокампуса наполнение и размещение его основных структурных компонентов было основано на анализе образовательных направлений в КГАУ (Казань) и опыте РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (Москва). В РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева работают 3034 сотрудника. Образовательный процесс организуют 1225 научно-педагогических работников, численность студентов, обучающихся в университете, составляет 15 365 чел. РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева имеет единый учебно-научно-производственный комплекс, объединяющий 8 факультетов, 3 института (Институт экономики и управления в АПК, Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина, Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова). Аналогом образовательного объекта для рассмотрения данных по расчетной численности обучающихся и преподавателей для подсчета необходимых площадей образовательных, жилых и прочих блоков является КГАУ.

Модель научно-образовательного кластера с аграрным профилем

Составной элемент образовательного кластера	Объекты
Наука	Базовые объекты для научно-исследовательской деятельности и создания инновационных продуктов: полевые опытные станции, лесная опытная дача, лаборатория защиты растений, научно-исследовательская и проектно-учебная лаборатории транспортных средств сельскохозяйственного направления
Образование	Ядро образовательного кластера – университет сельскохозяйственного направления, центр взаимосвязи и обмена знаниями и студентами с иностранными вузами
Бизнес	Учебные комбинаты, промышленные парки, предприятия АПК Казанской агломерации
Власть (органы государственной власти)	Министерские организации, профильные организации в области сельского хозяйства, профильные ассоциации
Институты гражданского общества	Общественные профильные организации, открытые опытные парки и сады, музеи, социальные объекты

Проектирование мастер-плана агрокампуса основывается на следующих принципах архитектурно-планировочной организации:

1. Принцип комплексности – интеграция с научно-опытным, испытательным блоком, бизнес-инкубатором, организация на одной территории, в едином периметре полного цикла высшего образования и научно-опытных процессов.

2. Принцип включенности в природный ландшафт – размещение базируется на сложившемся природном ландшафте местности.

3. Принцип технологичности заключается в использовании ресурсосберегающих технологий, обеспечении санитарно-гигиенических норм, применении солнечных батарей на фасадах и крышах зданий, сборе дождевой воды для полива полей и возможного использования в водообеспечении жилых и учебных корпусов, внедрении новейших технологий в области сельского хозяйства (системы орошения полей, вертикальные фермы и пр.).

4. Принцип открытости – территория разделена на 6 функциональных блоков: учебный, жилой, блок агробiotехнопарка, блок цветочного сада, блок выращивания саженцев, блок научно-опытных полей. Блоки связаны сетью коммуникаций. Предполагается наличие «открытых» блоков (доступных не только для обучающихся), где размещены теплицы, торгово-выставочный комплекс и парковая зона.

5. Принцип транспортной доступности – встраивание территории кампуса в общегородскую структурно-функциональную систему, обеспечение доступности объекта общественным и личным автотранспортом.

6. Принцип внутренней связанности и пешеходной доступности элементов кампуса.

Заключение

Основные выводы по работе состоят в следующем:

1. В работе изучены социальные, экономические и исторические предпосылки формирования территориальных образовательных кластеров. Исследователи выделяют ряд факторов, которые оказывают влияние на развитие образовательных кластеров: факторы внешней среды (политические, правовые, социальные, демографические, природно-географические); факторы, не контролируемые образовательной организацией (поведение партнеров, конкурентов, потребителей); факторы, контролируемые образовательной организацией (выбор образовательных услуг по направлениям, цели и задачи на долгосрочную перспективу). Анализ показал, что формирование ядра образовательного кластера кампуса отличается большим разнообразием градостроительных подходов. Выделяют три типа кампусов – городские распределенные комплексы, городские интегрированные комплексы, пригородные (загородные) локальные университетские кампусы. В России исторически сложились и наиболее распространены университетские городки, относящиеся к типу «городские локальные». В градостроительных решениях и подходах планирования кампуса во всем мире проявляются единые направления.

2. Выделены особенности градостроительного развития объектов высшего и среднего специального образования, проведен анализ размещения всех объектов (учебных, медицинских, жилых корпусов и обслуживающих объектов) высшего образования на территории Казани. Выявлено, что исторически

сложившиеся университеты Казани имеют городские кампусы распределенного типа. В городе также есть колледжи и производства соответствующего профиля, что формирует предпосылки для развития образовательных кластеров разной направленности.

3. Выделены принципы размещения и формирования образовательных кластеров, на основе которых рассмотрены предпосылки и перспективы формирования образовательного кластера в Казанской агломерации. С учетом природно-ландшафтных характеристик Верхнеуслонского района, существующих на его территории производственных сельскохозяйственных предприятий предложена градостроительная модель образовательного кластера агропрофиля, который может стать новой точкой роста Казанской агломерации. Разработан мастер-план ядра образовательного кластера – агрокампуса на территории Верхнеуслонского муниципального района в г. Иннополисе.

Практическое значение работы заключается в том, что предложенная методика формирования образовательных кластеров, апробированная на примере инновационного образовательного сельскохозяйственного кластера на территории Верхнеуслонского района, может быть использована в проектной практике для реорганизации существующих объектов высшего и среднего образования. Для дальнейшей работы можно выделить изучение и апробирование предложенной модели инновационного образовательного кластера в Республике Татарстан. Так, новым и актуальным направлением исследований может стать формирование и развитие политехнического образовательного кластера в Камской агломерации, а также формирование и развитие химико-технологического образовательного кластера в связке с нефтеперерабатывающей промышленностью на территории Альметьевской агломерации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цихан Т.В. Кластерная теория экономического развития // Теория и практика управления. 2003. № 5. С. 43–51.
2. Лизунов В.В. Роль кластеров в стратегическом планировании, инновационном развитии и конкурентоспособности регионов // Национальные приоритеты России. 2015. № 3 (17). С. 97–108.
3. Середович С.В., Рязанцева И.В. Модель образовательного кластера как элемент инновационного развития вуза // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2013. № 1 (21). С. 123–128.
4. Смирнов А.В. Образовательные кластеры и инновационное обучение в вузе. Казань : РИЦ «Школа», 2010. 102 с.
5. Тарасенко В. Территориальные кластеры: Семь инструментов управления. Москва : Альпина Паблишер, 2015. 201 с.
6. Kovaleva T.Yu., Baleevskih V.G. Identification of the Educational Clusters in the Regional Economy: Theory, Methodology and Research Results (in Example of Perm Krai) // Journal of Econometrics and Financial Management. 2014. V. 2. № 4. P. 153–162. DOI: 10.12691/ijefm-2-4-7
7. Porter M. Clusters and the new economics of competition // Harv Bus Rev. 1998, Nov-Dec. № 76 (6). P. 77–90.
8. Майзель А.И., Хутиева Е.С. Перспективы развития инновационных кластеров в Санкт-Петербурге // Управленческое консультирование. 2017. № 10 (106). С. 128–135. DOI 10.22394/1726-1139-2017-10-128-135

9. Porter M. Location, Competition, and Economic Development: Local Clusters in a Global Economy // *Journal Economic Development Quarterly*. 2000. V. 14. № 1. P. 15–34. DOI: 10.1177 / 089124240001400105
10. Батталова А.А., Батталов А.М. Основные преимущества страновых моделей, необходимые для формирования промышленных кластеров // *Вестник евразийской науки*. 2014. №1 (20).
11. Aitbayeva G.D., Zhubanova M.K., Kulgildinova T. A., Tusupbekova G. M., Uaisova G. I. Formation of Education Clusters as a Way to Improve Education // *International journal of environmental & science education*. 2016. Vol. 11. №. 9. P. 3053–3064. DOI: 10.12973/ijese.2016.735a
12. Chernobrovina A., Shehovtsova L., Oboznyy D. Concept of the educational cluster creating in the field of construction industry // *MATEC Web of Conferences*. 2017. № 106. 09006. DOI: 10.1051/mateconf/20171060
13. Бузина Т.С., Иванько Я.М. Информационное обеспечение моделей агропромышленных кластеров // *Вестник ВГТУ*. 2010. № 3. С. 53–57.
14. Некрасов С.И., Некрасова Ю.А. Профессионально-образовательный кластер агропрофиля: расширение сферы влияния // *Advances in Science and Technology : сборник статей IX Международной научно-практической конференции*. Москва : Научно-издательский центр «Актуальность. РФ», 2017. С. 131–132.
15. Брундукова В.А., Денисенко Е.В. Принципы формирования образовательных центров // *Известия КазГАСУ*. 2018. № 3 (45). С. 81–87.
16. Зобова М.Г. Современные аспекты архитектурно-градостроительного проектирования университетских кампусов // *Вестник ОГУ*. 2015. № 3 (178). С. 243–248.
17. Akhtiamov I., Akhtiamova R. Architecture of innovative educational spaces of a university campus. On the example of SYSTEMS Centre of Engineering Systems in Construction at KSUAE (Kazan, Russia) // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. V. 890 article 012018. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012018
18. *Guide to the Creation of a Strategic Campus Master Plan* // Office for Facilities Planning, National Facilities Division Department of Facilities Planning and Administration, Minister's Secretariat Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. 2011. P. 62.
19. Özkana D.G., Alpaka E.M., Var M. Design and construction process in campus open spaces: A case study of Karadeniz Technical University // *Urban design International*. 2017. DOI: 10.1057/s41289-017-0041-0

REFERENCES

1. Tsikhan T.V. Klasternaya teoriya ekonomicheskogo razvitiya [Cluster theory of economic development]. *Teoriya i praktika upravleniya*. 2003. No. 5. Pp. 43–51. (rus)
2. Lizunov V.V. Rol' klasterov v strategicheskom planirovanii, innovatsionnom razvitii i konkurentosposobnosti regionov [The role of clusters in strategic planning, innovation development and regional competitiveness]. *Nacionalnye priority Rossii*. 2015. No. 3 (17). Pp. 97–108. (rus)
3. Seredovich S.V., Ryazantseva I.V. Model' obrazovatel'nogo klastera kak element innovatsionnogo razvitiya vuza [The model of the educational cluster as an element of innovative development of the university]. *Vestnik of SSUGT*. 2013. No. 1 (21). Pp. 123–128. (rus)
4. Smirnov A.V. Obrazovatel'nye klastery i innovatsionnoe obuchenie v vuze [Educational clusters and innovative learning in higher education]. Kazan: Shkola, 2010. 102 p. (rus)
5. Tarasenko V. Territorial'nye klastery: Sem' instrumentov upravleniya [Territorial clusters: Seven management tools]. Moscow: Alpina, 2015. 201 p. (rus)
6. Kovaleva T.Yu., Baleevskiy V.G. Identification of the educational clusters in the regional economy: Theory, methodology and research results (Perm Krai). *Journal of Econometrics and Financial Management*. 2014. V. 2. No. 4. Pp. 153–162. DOI: 10.12691/ijefm-2-4-7
7. Porter M. Clusters and the new economics of competition. *Harvard Business Review*. 1998. No. 76 (6). Pp. 77–90.
8. Maizel A.I., Khutueva E.S. Perspektivy razvitiya innovatsionnykh klasterov v Sankt-Peterburge [The prospects of development of innovative clusters in Saint-Petersburg]. *Upravlencheskoe*

- konsul'tirovanie. 2017. No. 10 (106). Pp. 128–135. DOI 10.22394/1726-1139-2017-10-128-135. (rus)
9. Porter M. Location, competition, and economic development: Local clusters in a global economy. *Journal Economic Development Quarterly*. 2000. V. 14. No. 1. Pp. 15–34. DOI: 10.1177/089124240001400105
 10. Battalova A.A., Battalov A.M. Osnovnye preimushchestva stranovykh modelei, neobkhodimye dlya formirovaniya promyshlennykh klasterov [The main advantages of country models necessary for the formation of industrial clusters]. *Vestnik evraziiskoi nauki*. 2014. No. 1 (20). (rus)
 11. Aitbayeva G.D., Zhubanova M.K., Kulgildinova T.A., Tusupbekova G.M., Uaisova G.I. Formation of education clusters as a way to improve education. *International Journal of Environmental & Science Education*. 2016. V. 11. No. 9. Pp. 3053–3064. DOI: 10.12973/ijese.2016.735a
 12. Chernobrovina A., Shehovtsova L., Oboznyi D. Concept of the educational cluster creating in the field of construction industry. *MATEC Web of Conferences*. 2017. No. 106, 09006. DOI: 10.1051/mateconf/20171060
 13. Buzina T.S., Ivan'o Y.M. Informatsionnoe obespechenie modelei agropromyshlennykh klasterov [Information supply of models of agroindustrial clusters]. *Vestnik VGTU*. 2010. No. 3. Pp. 53–57. (rus)
 14. Nekrasov S.I., Nekrasova Yu.A. Professional'no-obrazovatel'nyi klaster agropofilya: rasshiren timer sfery vliyaniya [Professional and educational agropofile cluster: expansion of the sphere of influence]. In: *Advances in Science and Technology: sbornik statei IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Proc. 9th Sci. Conf 'Advances in Science and Technology')*, Moscow: Aktual'nost'. RF, 2017. Pp. 131–132. (rus)
 15. Brundukova V.A., Denisenko E.V. Printsipy formirovaniya obrazovatel'nykh tsentrov [Principles of the formation of educational centers]. *Izvestiya KazGASU*. 2018. No. 3 (45). Pp. 81–87. (rus)
 16. Zobova M.G. Sovremennye aspekty arkhitekturno-gradostroitel'nogo proektirovaniya universitetskikh kampusov [Modern aspects of architectural and urban planning of university campuses]. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2015. No. 3 (178). Pp. 243–248. (rus)
 17. Akhtiamov I., Akhtiamova R. Architecture of innovative educational spaces of a university campus. On the example of SYSTEMS Centre of Engineering Systems in Construction at KSUAE (Kazan, Russia). *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. V. 890. 012018. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012018
 18. Guide to the creation of a strategic campus master plan. Office for Facilities Planning, National Facilities Division Department of Facilities Planning and Administration, Minister's Secretariat Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. 2011. 62 p.
 19. Özkana D.G., Alpaka E.M., Var M. Design and construction process in campus open spaces: A case study of Karadeniz Technical University. *Urban Design International*. 2017. DOI: 10.1057/s41289-017-0041-0

Сведения об авторах

Егорова София Сергеевна, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 420043, г. Казань, ул. Зелёная, 1, s.e_94@bk.ru

Закирова Юлия Александровна, канд. архитектуры, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 420043, г. Казань, ул. Зелёная, 1, jzakirova@gmail.com

Authors Details

Sofia S. Egorova, Research Assistant, Kazan State University of Architecture and Engineering, 1, Zelenaya Str., 420043 Kazan, Tatarstan, Russia, s.e_94@bk.ru

Yuliya A. Zakirova, PhD, A/Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, 1, Zelenaya Str., 420043 Kazan, Tatarstan, Russia, jzakirova@gmail.com

УДК 711:721

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-46-55

*Д.В. МИХАЙЛЕНКО, Л.М. РЕЗНИЦКАЯ,
Южный федеральный университет*

ПРОЕКТНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЭКОЛОГО-АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ДОНСКАЯ ТРОЯ»

Целью работы стало формирование комплексных концептуальных архитектурно-дизайнерских решений проектируемого эколого-археологического комплекса «Донская Троя». Уникальный памятник археологии, возведённый в XVII в. до н. э. племенами северокавказской катакомбной культуры, расположен в западной части г. Ростова-на-Дону, на правом берегу р. Мёртвый Донец, между пос. Каратаево и Ливенцовка в Советском районе. Каменные крепости были обнаружены археологами в 60-х гг. XX в. и являются самыми древними из найденных на территории Восточной Европы. Тема сохранения Ливенцовского археологического ансамбля является крайне актуальной, т. к. на сегодняшний день территория находится в плачевном состоянии – дачные свалки мусора, разрушающиеся стены памятника. В СМИ довольно остро обсуждаются вопросы о печальной судьбе этой территории. Для раскрытия уникального историко-культурного потенциала территории Ливенцовской и Каратаевской крепостей предлагается создание особого музея как симбиоза живого этноландшафта, музея под открытым небом, фестивального пространства, музея закрытого типа с исследовательским центром и других вспомогательных просветительско-развлекательных зон. Градостроительная, архитектурно-пространственная, сценарно-функциональная и художественно-образная концепции музея тесно связаны с имеющимися историко-культурными артефактами, идеями «живого этноландшафта», образом жизни людей из воссоздаваемых времён и современными тенденциями в проектировании музейных комплексов.

Ключевые слова: музей под открытым небом; Ливенцовская крепость; Каратаевская крепость; «Донская Троя»; бронзовый век; археологический памятник; археологический музей; подходы к проектированию; выявление тенденций; проблематика места; архитектурно-пространственная концепция; сценарно-функциональная концепция.

Для цитирования: Михайленко Д.В., Резницкая Л.М. Проектная концепция эколого-археологического комплекса «Донская Троя» // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 46–55.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-46-55

*D.V. MIKHAILENKO, L.M. REZNITSKAYA,
Southern Federal University*

THE CONCEPT OF ECOLOGICAL AND ARCHEOLOGICAL SITE "DONSKAYA TROYA"

The aim of the work is to form conceptual solutions of the ecological and archaeological site "Donskaya Troya". The unique archaeological site founded in the 17th century, BC by the tribes of the North Caucasian catacomb culture locates westward Rostov-on-Don, on the right bank of the Mervy Donets River, between Karataevo and Liventsovka villages in the Soviet region. The stone fortresses discovered by archaeologists in the 1960s, are the oldest in Eastern Europe. The preservation of the Liventsovka archaeological ensemble is very relevant, since

today it is in a deplorable state, namely excavations with bushes, dacha garbage dumps, dilapidated walls and ditches filled with stones. The media quite keenly discuss the sad fate of this territory. The paper proposes to create a museum to show the unique historical and cultural potential of the Karataevo and Liventsovka fortresses, which will be an open-air museum, a festival space with a research center and other educational and entertainment areas. Urban planning, scenario-functional and artistic-figurative concepts of the museum relate to the existing historical and cultural artifacts, the ideas of a "living ethnic landscape", the life of people from re-created times and modern trends in the design of museum complexes.

Keywords: open-air museum; Liventsovskaya and Karataevskaya fortresses; Donskaya Troya; Bronze Age; archaeological monument; archaeological museum; design approach; architectural-spatial concept; scenario-functional concept.

For citation: Mikhailenko D.V., Reznitskaya L.M. Proektnaya kontseptsiya ekologo-arkheologicheskogo kompleksa "Donskaya Troya" [The concept of ecological and archeological site "Donskaya Troya"]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 2. Pp. 46–55.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-46-55

Целью работы стало формирование комплексных концептуальных архитектурно-дизайнерских решений проектируемого эколого-археологического комплекса «Донская Троя». На основе отечественного и зарубежного опыта проектирования и функционирования таких музеев под открытым небом, как Троя в Турции, Помпеи в Италии, Археологический ансамбль в г. Мериде в Испании, Танаис в Мясниковском районе Ростовской области и других, были выявлены основные подходы, принципы, факторы влияния и тенденции проектирования музеев.

Термин «музей под открытым небом» не имеет чётко выраженных границ и строгих определений и порой трактуется слишком широко. Например, в Российской музейной энциклопедии указано, что это «группа музеев, основные объекты и экспозиции которых расположены вне помещений, на открытых территориях» [1]. Считается, что история возникновения музеев под открытым небом началась в 1891 г., поскольку именно тогда шведский исследователь и этнограф Артур Хазелиус открыл доступ публики к объектам на о. Дьюргарден. Это были жилые дома и хозяйственные постройки, вывезенные в 1885 г. из селения Мора [2]. Такой тип музея-деревни называли Скансен. Сейчас музеи под открытым небом становятся «точками роста» для сельских и городских поселений, а также информационными центрами с демонстрацией большого разнообразия проектов. Идеология и принципы архитектурно-пространственной и тематической организации таких типов со временем трансформировались, и наметились новые тенденции в собрании музеев. Однако остались базовыми такие принципы, как сохранение памятников народного зодчества и демонстрация того или иного вида культуры и этнографических коллекций.

Уникальный памятник археологии, возведённый в XVII в. до н. э. племенами северокавказской катакомбной культуры, расположен в западной части г. Ростова-на-Дону, на правом берегу р. Мёртвый Донец, между пос. Каратаево и Ливенцовка в Советском районе. Каменные крепости были обнаружены археологами в 60-х гг. XX в. и являются древнейшими из найденных

на территории Восточной Европы [3]. На площади в 7,5 га находится сразу несколько исторических памятников. На первой надпойменной террасе р. Мертвый Донец были найдены остатки поселений энеолита, культур средней и поздней бронзы, времени Хазарского каганата и Золотой Орды, второй половины XVIII в. Также на территории расположены и грунтовые некрополи, курганы, стойбища, датируемые III в. до н. э. и до Средневековья. Комплекс, состоящий из двух крепостей, представляет собой огромную историческую значимость, сопоставимую с древним городом-крепостью Троя. Исследуемый памятник раннего градостроительного устройства интересен архитекторам для изучения как «протогород» [4].

Музеефикация уникальных памятников археологического наследия страны является одной из важных задач и требований нашего времени. В большинстве случаев такие объекты являются неповторимыми и представляют ценность для национального, евразийского или общечеловеческого наследия [5]. Также музеефикация археологического наследия – это своего рода база для развития туристического бизнеса, изменения бизнес-структуры региона и одновременно мощное образовательное и культурное средство для формирования привлекательного образа региона, территории и страны в целом.

Министерством культуры Ростовской области намечен план сохранения и развития культурного и исторического наследия территории Ливенцовской и Каратаевской крепостей, а также комплексного развития туризма. Это указано в постановлении об утверждении государственной программы Ростовской области «Развитие культуры и туризма» № 653 от 17 октября 2018 г. Сейчас область входит в состав международного проекта «Золотое кольцо Боспорского царства» – туристического маршрута по местам городов древних государств. Тематика рассматриваемой для проектирования территории «Донская Троя» является уникальной и перспективной для дальнейшего сотрудничества с разнообразными музеями, например с музеем-заповедником «Танаис».

Тема сохранения Ливенцовского археологического ансамбля является крайне актуальной, т. к. на сегодняшний день территория находится в плачевном состоянии – это заросшие кустарниками раскопы, дачные свалки мусора, полуразрушенные стены и рвы, заполненные камнями. В СМИ довольно остро обсуждаются вопросы о печальной судьбе памятника [6].

Сохранились наброски реконструкции сооружений памятника, выполненные Станиславом Никифоровичем Братченко – его первооткрывателем и исследователем (рис. 1). Именно он в своих работах предложил название комплекса «Донская Троя» [7].

Современные задачи сохранения и использования археологического наследия достаточно четко обозначены в международных документах ООН и ЮНЕСКО по культурному наследию; материалах международных коллоквиумов ЮНЕСКО «Археология и обустройство территории» (Франция, 1987); «Археология городов Европы: консервация и обустройство» (Португалия, 1990); «Хартии Краковского симпозиума по культурному наследию» (1991); «Программе ООН по сохранению культурно-исторического наследия». В этих международных документах указывается на обязанности выявления, изучения, сохранения и использования памятников археологического наследия, расположенных на территории того или иного государства.



Рис. 1. План-схема Ливенцовского археологического комплекса. Автор С.Н. Братченко

Тема исследования проблем проектирования музейных пространств является актуальной, ей занимаются многие ведущие архитектурные школы, среди которых лаборатория музейного проектирования при Российской академии наук, при университете Лестера в Англии. Социокультурные практики современного музея рассматривают культурологи Е.Н. Мастеница, Л.М. Шляхтина, Л.А. Худякова, И.Н. Захарченко. Принципы и концепции проектирования предлагают архитекторы Р. Пьяно [12], Р. Майер, Т. Андо, Т. Дункан, Л. Виггерс и др. Значительное число исследователей раскрывают зарубежный и отечественный опыт музеефикации историко-культурного наследия: О.Н. Бадер, Н.М. Булатов, Д.Г. Зданович, Ю.А. Веденин, А.И. Мартынов, А.М. Кулемзин, Н.А. Никишин, Д.Б. Шелов, Я.Г. Мокеев, А. Йонг, М. Скоугорд, Э. Норденсон, К. Зойнер, Юн Ху, М. Станчева, М.И. Гарбер, М. Альбини, Б. Султов.

Вопросы ландшафтной археологии затрагиваются в работах М.Е. Кулешовой, Г.С. Лебедева, С.В. Гусева, П.М. Корявцева, Н.А. Кренке, Е.Г. Ершовой, Е.Н. Спиридоновой, С.З. Чернова, В.С. Давыдчук, И.К. Фролова, М.И. Гоняного, В.И. Паранина, В.И. Семеновой, И.К. Бахтиной.

Принципы музеефикации археологических объектов рассмотрены в работах В.А. Трифонова, Д.Б. Шелова, О.Н. Бадера, Н.М. Булатова, А.И. Мартынова, Н.А. Никишина.

В ходе изучения аналоговых отечественных и зарубежных объектов, конкурсных проектов, а также научных исследований по изучаемой тематике были сделаны следующие выводы:

1. Возникающие новые музейные технологии и виды взаимодействия информации с посетителем дают мощнейший толчок в модернизации и организации новых музейных пространств [8].

2. В связи с появлением новых форм экспонирования возникли новые способы вовлечения посетителя в жизнь музея. Анализ опыта российских и зарубежных примеров музеефикации [9] позволяет выделить «сценарный» тип экспозиции, при котором посетитель погружается в жизнь музея и непосредственно участвует в предлагаемой роли.

3. Использование инновационных технологий как нового способа музеефикации для современных музеев становится неотъемлемой частью. Происходит смена модели функционирования музея, расширяется спектр направлений музейно-выставочных работ, что способствует более полному раскрытию и погружению гостя в тематику культурного пространства [10].

4. Экологическая парадигма влияет на принципиальные подходы к созданию музеев под открытым небом: рекреационная зона выступает в роли живого «этноландшафта», где визуализируются и выявляются наиболее характерные черты ландшафта, в котором происходила жизнь этноса. Ставится задача выработки у посетителей ощущения эффекта присутствия и деятельного включения в исторический событийный ряд в предлагаемых обстоятельствах [11].

5. Музей всё чаще выступает интегратором новых культурных явлений, влияет на развитие города (близлежащих городов), становится знаковым местом – визитной карточкой, включается в крупный экскурсионный маршрут.

6. По взаимодействию архитектурно-образного решения музея с исторической местностью можно выделить следующие методы: растворение (например, «Остров-музей Бисбос»), поддержание стилистики (археологический парк «Аргамач» и музей «Индийский посёлок Сан-Уотч»), современная трактовка («Музей Трои» в Турции), контраст (Стеклянная пирамида перед входом в Лувр).

7. Важную функциональную, композиционную и образную роль играют конструкции перекрытий над раскопами, которые могут быть выполнены в разных материалах и конструктивных системах. Они не только обеспечивают защиту артефактов от погодных условий и солнечных лучей, но и являются весомыми визуальными объёмами, которые влияют на образ музея в целом.

Факторами, влияющими на концептуальное архитектурно-дизайнерское решение эколого-археологического комплекса «Донская Троя», являются:

- характер градостроительного окружения;
- транспортно-пешеходная доступность места;
- наброски реконструкции сооружений памятника, выполненные

С.Н. Братченко;

- специфика объекта культурного (археологического) наследия;
- степень его изученности и сохранности;

– правовой режим территории: приказ от 30 мая 2012 г. № 232 «Об утверждении границы территории и правового режима земельного участка в границе территории объекта культурного (археологического) наследия регионального значения «Ливенцовский археологический комплекс эпохи бронзы: Ливенцовское поселение; Ливенцовская крепость; Ливенцовский курганный могильник (23 насыпи); Каратаевская крепость»;

- образы жизни и история проживающих на территории племен;
- цивилизационная и технологическая катастрофа бронзового века.

На основе выявленных тенденций и факторов влияния была сформирована архитектурно-планировочная концепция эколого-археологического комплекса «Донская Троя». Для раскрытия уникального историко-культурного потенциала территории Ливенцовской и Каратаевской крепостей предлагается создание особого музея как симбиоза живого этноландшафта, музея под открытым небом, фестивального пространства, музея закрытого типа с исследовательским центром и других вспомогательных просветительско-развлекательных зон.

Градостроительной концепцией эколого-археологического комплекса стало формирование культурно значимого участка города в западной части Ростова-на-Дону, в зоне садовых хозяйств. Расположение крупного музейного комплекса в этом месте актуально, т. к. участок находится на данный момент в заброшенном состоянии и имеет множество скрытых культурных ресурсов. В непосредственной близости от территории проходят автомагистрали и железная дорога, по которой курсируют поезда и электрички междугородних направлений, а также внутренняя «городская электричка», соединяющая все основные части города. Примерно в 300 м от участка расположена железнодорожная станция «Сады». Такое тесное соседство с железной дорогой, с одной стороны, является преимуществом и может увеличить поток посетителей, а с другой стороны, выступает неблагоприятным фактором, который создаёт дополнительный шум и вибрации. Для организации комфортной среды необходимо предусмотреть с северо-восточной стороны участка шумозащитные мероприятия.

С учётом особенностей территории проектирования **архитектурно-пространственная концепция** основывается на симбиозе ландшафта, мест археологических раскопов и архитектурного объёма музея. Предлагается ярусное и многомерное освоение территории с максимальным сохранением естественного рельефа. Таким образом, рекреационная зона выступает в роли живого «этноландшафта» [11], где отражаются наиболее характерные черты территории, на которой проходила жизнь этноса. Такой «живой музей» делает возможным передачу народных ценностей через поколения и служит важнейшим фактором формирования этнической идентичности.

Центральным звеном композиции являются две воссозданные крепости и объём музея между ними.

Многоуровневое здание музея закрытого типа предполагается интегрировать в существующий ландшафт. Это позволит обнажить и музеефицировать интересные для изучения участки культурного слоя Ливенцовского и Каратаевского поселений.

Основными функциональными зонами генплана являются (рис. 2):

1. Входная зона, размещённая на северо-востоке участка.
2. Зоны крытых и открытых раскопов, которые оборудованы удобными смотровыми площадками, где посетители смогут наблюдать за тем, как происходит работа археологов, и рассматривать экспонаты в месте их обнаружения.
3. Лапидарии, в которых выставлена экспозиция древних каменных сооружений, собранных из археологических раскопок на территории Ростовской области.



Рис. 2. Схема генплана проектируемого эколого-археологического комплекса «Донская Троя»

4. Фестивальная площадка, на которой будут проходить массовые мероприятия, с оборудованной сценой, экраном для показа тематических видео и местами для зрителей.

5. Лёгкая конструкция со вставками каменной кладки, имитирующая Ливенцовскую и Каратаевскую крепости. Это образный макет для общего представления объёмов крепостных сооружений, по верхнему ярусу которых предлагается экскурсия из основного здания музея.

6. Зоны мастер-классов, связанные с типичными ремеслами (гончарное ремесло, бронзовое литье, изготовление орудий труда, оружия, ювелирных украшений, скотоводство, земледелие, рыбная ловля, шитье одежды, торговля, строительство), расположенные в фестивальной зоне за сценой под смотровым мостом, а также в зоне Ливенцовской крепости.

7. Интегрированный в ландшафт музейный комплекс (музей закрытого типа).

8. Зона Каратаевской крепости – западная часть территории, которая представляет собой шумозащитные мероприятия, парковую зону с пешеход-

ными тропами. Проектирование в этой части стационарных объектов ограничено из-за прохождения нефтепроводов.

9. Зоны отдыха с игровыми площадками, на которых планируется осуществление исторических реконструкций: бои по захвату крепости, проведение турниров.

10. Зона палаточного поселения, которая предполагает размещение посетителей на территории комплекса в окружении «живого этноландшафта» [11] для большего погружения в историю и атмосферу места.

11. Набережная, имеющая дебаркадер для проведения экологических исследований вод р. Мёртвый Донец и иных мероприятий, место проведения выставки исторических плавсредств и тематических мастер-классов, лодочный причал для осуществления речных прогулок.

12. Зона перспективного развития музея, расположенная на противоположном берегу р. Мёртвый Донец. В этой зоне предполагается обустройство мест для ловли рыбы, выпаса скота и различных мероприятий сценарного типа. Переход в эту зону осуществляется через мост.

Сценарно-функциональная, или программная, концепция опирается на историю образования Каратаевской и Ливенцовской крепостей, в целом историю г. Ростова-на-Дону, а также на образы жизни народов, когда-то заселявших данную территорию, на их быт и традиции.

Предлагается развитая сеть дорог и пешеходных троп для связи планируемой территории в единый комплекс, где без труда можно попасть в любую его часть. Во входной зоне посетителю предоставляется возможность осуществить экскурсию легковым электротранспортом.

В здании музея закрытого типа посетитель сможет ознакомиться с историей строительства крепостей, погрузиться в атмосферу яростных битв и культуру народов, когда-то здесь живших. В самом нижнем экспозиционном уровне предлагается организация масштабной выставки для сравнения разных крепостей из других эпох и мест. Это позволит увидеть объект экспонирования не локально, а в мировой структуре становления «протогородов» [4].

В проекте планируется использование «сценарного» типа экспозиций. Таким образом, в музее происходит театрализованное представление и эмпирическое познание, когда актёры – это не только сотрудники музея, но и люди, желающие окунуться в историю.

Художественно-образная дизайн-концепция среды используется для возникновения у посетителей исторических образов, незабываемых эмоций и впечатлений. Выставленные артефакты, природные формы, колористика и другие ассоциативные маркеры распределяются территориально по всему комплексу, формируют маршруты и составляют художественно-образную ткань среды.

Для того чтобы усилить чувственное переживание от пребывания в музейном комплексе, предполагается создание разных сценариев визуальных практик, которые сформулировала в своём автореферате «Архитектура музейных зданий второй половины XX – начала XXI века» Елена Сергеевна Бакушкина. Это сценарии, связанные с формированием тактильных ощущений, с чувствительностью к свету и с построением пространства индивидуального

сенсорного поля [12]. Эти смысловые модели будут реализованы в экспериментальной модели комплекса «Донская Троя» благодаря:

- обильному использованию природных текстур в облицовке, имитации старинной каменной кладки крепостей и материалов с разными металлическими отливками, характеризующих эпохи развития крепостей (медь, бронза, железо);
- разработке программы освещения территории комплекса и создания световых эффектов в здании музея, которые будут влиять на восприятие пространства, тем самым усиливая взаимодействие посетителя с музейной коллекцией;
- формированию внутри главного корпуса музея трансформируемых, многомерных и перетекающих друг в друга выставочных пространств.

Таким образом, градостроительная, архитектурно-пространственная, сценарно-функциональная и художественно-образная концепции музея тесно связаны с имеющимися историко-культурными артефактами, идеями «живого этноландшафта», образом жизни людей из воссоздаваемых времён и современными тенденциями в проектировании музейных комплексов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Янин В.Л. Российская музейная энциклопедия. Москва : Прогресс : РИПОЛ классик, 2005. С. 393.
2. Севан О.Г. Музеи под открытым небом Европы // Обсерватория культуры. 2006. № 3. С. 60–69.
3. Vodolazhskaya L.N., Ilyukov L.S. Archaeoastronomy and Ancient Technologies. 2019. 7 (1). P. 148–198. URL: http://aaatec.org/art/a_vl14
4. Шахова Н.А. О сущности и археологических критериях древнего города // Проблемы истории, филологии, культуры. Москва : Магнитогорск, 1995. Вып. 2. С. 6–16.
5. Мартынов А.И. Особенности и проблемы музеефикации культурно-исторического наследия России // Международная научно-практическая конференция «Музеи-заповедники – музеи будущего». Елабуга, 2014. С. 35–45.
6. Морозова Ю.А. Троя на Дону // Аргументы и факты. На Дону. 2019. № 13.
7. Братченко С.Н. Левенцовская фортеця. Пам'ятка архітектури бронзового століття // Матеріали та дослідження з археології східної України. Луганськ, 2006. С. 32–298.
8. Федотова Н.Ю. Современные тенденции музейной модернизации: анализ новых архитектурных проектов // Артикульт. 2014. 16 (4). С. 49–53.
9. Щербина А.В. Музейное проектирование. Тольятти. Томск : ТГУ, 2011. С. 67.
10. Giebelhausen M. New museum theory and practice: an introduction. Oxford, 2006. P. 44.
11. Давыдов А.Н. Моделирование этносферы и живая традиция: особенности формирования и экспозиции музея под открытым небом // Музеи под открытым небом. Архангельск, 2016. С. 12–18.
12. Бакушкина Е.С. Архитектура музейных зданий второй половины XX – начала XXI века : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата искусствоведения : 17.00.04 / Бакушкина Елена Сергеевна ; Рос. гос. пед. ун-т им. А.И. Герцена. Санкт-Петербург, 2016. 26 с.

REFERENCES

1. Yanin V.L. Rossiiskaya muzeinaya entsiklopediya [Russian Museum Encyclopedia]. Moscow: Progress; RIPOL klassik, 2005, 393 p. (rus)
2. Sevan O.G. Muzei pod otkrytym nebom Evropy [European open-air museums]. *Observatoriya kul'tury*. 2006. No. 3. Pp. 60–69. (rus)
3. Vodolazhskaya L.N., Ilyukov L.S. *Archaeoastronomy and Ancient Technologies*. 2019. V. 7. No. 1. Pp. 148–198.

4. *Shakhova N.A.* O sushchnosti i arkhеologicheskikh kriteriyakh drevnego goroda [Archaeological criteria of the ancient city]. In: Problemy istorii, filologii, kul'tury. Moscow; Magnitogorsk, 1995. No. 2. Pp. 6–16. (rus)
5. *Martynov A.I.* Osobennosti i problemy muzeifikatsii kul'turno-istoricheskogo naslediya Rossii [Problems of museumification of Russian cultural and historical heritage]. In: Muzei-zapovedniki – muzei budushchego. Elabuga. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya (*Proc. Int. Sci. Conf 'Museum Sanctuaries – Museums of the Future*). Elabuga, 2014. Pp. 35–45. (rus)
6. *Morozova Yu.A.* Troya Na Donu [Troy-on-Don]. Newspaper "Argumenty i Fakty. Na Donu". No. 13, 2019. (rus)
7. *Bratchenko S.N.* Leventsovskaya fortetsya. Pam'yatka arkhitekturi bronzovogo stolittya [Monument of Bronze Age architecture]. In: Materiali ta doslidzhennya z arkhеologii skhidnoi Ukraïni. Lugans'k, 2006. Pp. 32–298. (rus)
8. *Fedotova N.Yu.* Sovremennye tendentsii muzeinoi modernizatsii: analiz novykh arkhitekturnykh projektov [Modern trends in museum modernization: Analysis of new architectural projects]. *Artikul't.* 2014. 16. No. 4. Pp. 49–53. (rus)
9. *Shcherbina A.V.* Muzeinoe proektirovanie [Museum design.]. Tolyatti, 2011. 67 p.(rus)
10. *Giebelhausen M.* New museum theory and practice: An introduction. Oxford, 2006. 44 p.
11. *Davydov A.N.* Modelirovanie etnosfery i zhivaya traditsiya: osobennosti formirovaniya i ekspozitsii muzeya pod otkrytym nebom [Modeling of ethnic sphere and living tradition: Formation and exposition of open-air museum]. In: Muzei pod otkrytym nebom. Arkhangel'sk, 2016. Pp. 12–18. (rus)
12. *Bakushkina E.S.* Arkhitektura muzeinykh zdaniy vtoroi poloviny XX – nachala XXI veka: avtoreferat dis. kandidata iskusstvovedeniya [Architecture of museum buildings of in the 20–21st centuries. PhD Abstract]. Saint-Peterburg, 2016. 26 p. (rus)

Сведения об авторах

Михайленко Дарья Вячеславовна, магистр, Академия архитектуры и искусств Южного федерального университета, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, archdar@yandex.ru

Резницкая Лариса Мартыновна, доцент, Академия архитектуры и искусств Южного федерального университета, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, leolara19@yandex.ru

Authors Details

Darya V. Mikhailenko, Master, Southern Federal University, 105/42, Bolshaya Sadovaya Str., 344006, Rostov-on-Don, Russia, archdar@yandex.ru

Larisa M. Reznitskaya, A/Professor, Southern Federal University, 105/42, Bolshaya Sadovaya Str., 344006, Rostov-on-Don, Russia, leolara19@yandex.ru

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 69.04, 534.11, 620.1

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-56-64

*А.А. ГАВРИЛОВ¹, Г.И. ГРЕБЕНЮК², В.И. МАКСАК², Н.А. МОРОЗОВ¹,
¹Оренбургский государственный университет,
²Томский государственный архитектурно-строительный университет*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ С МОДЕЛИРОВАНИЕМ ТРЕЩИНЫ

Исследование посвящено разработке подходов к обнаружению трещин в металлических стержневых конструкциях на основе анализа изменений собственных частот низших форм колебаний. В исследовании проводились натурный и численный эксперименты, сравнивались результаты частот. Натурный эксперимент проводился с использованием виброанализатора, для численного эксперимента применялась система Autodesk Inventor. Учитывалось внутреннее трение, что позволило уточнить места расположения пучностей различных форм колебаний с помощью специально созданной для этих целей программы. В модели учитывались датчики, применяемые в натурном эксперименте, как массы, влияющие на амплитудно-частотные характеристики. Получены зависимости для определения частот собственных колебаний при наличии трещин и для определения места расположения трещины. Установленные варианты полиномиальной зависимости места расположения модели трещины от частот первых низших четырех форм колебаний стержня могут быть использованы для анализа положения трещин в консольных балках.

Ключевые слова: собственные колебания; частота; тонкостенный стержень; трещина; виброанализатор; моды колебаний.

Для цитирования: Гаврилов А.А., Гребенюк Г.И., Максак В.И., Морозов Н.А. Исследование частот собственных колебаний металлического стержня с моделированием трещины // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 56–64.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-56-64

*A.A. GAVRILOV¹, G.I. GREBENYUK², V.I. MAKSAC², N.A. MOROZOV¹,
¹Orenburg State University,
²Tomsk State University of Architecture and Building*

CRACK MODELING OF METAL ROD EIGEN-FREQUENCIES

The paper presents the development of approaches to the crack detection in metal rod structures based on the analysis of the lowest eigen-frequency modes. Full-scale experiments and

numerical calculations are carried out, and the obtained results are compared. A vibration analyzer is used for full-scale experiments, and numerical calculations are performed by using Autodesk Inventor. With regard to the internal friction, the antinodes of various vibration forms were identified using a specially developed program. The model includes sensors for the field experiment as masses affecting the frequency-response characteristics. The dependences are obtained for eigen-frequencies in the presence of cracks and for the crack locations. The polynomial dependences of the crack location on the lowest eigen-frequency modes of the rod can be used to analyze the crack position of in cantilever beams.

Keywords: eigen-frequency; thin-walled bar; crack; vibration analyzer; vibration modes.

For citation: Gavrilov A.A., Grebenyuk G.I., Maksak V.I., Morozov N.A. Issledovanie chastot sobstvennykh kolebaniy metallichesкого stержnya s modelirovaniem treshchiny [Crack modeling of metal rod eigen-frequencies]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 2. Pp. 56–64.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-56-64

Введение

Широкое распространение металлических тонкостенных стержневых конструкций делает необходимым разработку методов и средств диагностики дефектов, возникающих в данных конструкциях в процессе эксплуатации. Одним из наиболее распространенных дефектов являются трещины. Причины возникновения трещин достаточно разнообразны: от несовершенства процессов изготовления конструкций до усталости и коррозии металлов в процессе эксплуатации. В связи с этим разработки, направленные на выявление трещин в металлических тонкостенных стержневых конструкциях, являются весьма актуальными.

В настоящее время исследованию влияния трещин на изменение динамических характеристик балочных конструкций, а также идентификации трещин посвящено много работ. По измерению первой и второй собственных частот колебаний производится идентификация трещины в работе [1], что позволило однозначно определить глубину и положение повреждения малых трещин. В статье [2] описывается метод, позволяющий вычислить местоположение трещины в стержне по собственным частотам продольных колебаний, в [3] процедура обнаружения трещин основана на методе глобального поиска с использованием генетических алгоритмов, поэтому не накладывает никаких ограничений на местоположение, размер и количество трещин, которые могут быть обнаружены. В работе [4] предлагается конечно-элементный анализ конструкции и приводятся тестовые расчеты на примере балки-стенки без трещины и при наличии трещины. Учет внутреннего трения и затухания из-за наличия трещины производится в работе [5]. В этом случае повышенная гибкость, появляющаяся благодаря наличию трещины, была смоделирована невесомой пружиной, а увеличенное демпфирование было смоделировано невесомым демпфером в месте расположения трещины, на основании чего рассчитывался коэффициент затухания.

В настоящей работе исследуются изгибные колебания стержня, а оптимизация процедуры поиска расположения трещин основана на анализе изменения

собственных частот колебаний. Целью данного исследования является получение зависимостей координат мест расположения трещин от частот низших форм колебаний стержней на основе экспериментальных исследований.

Методы исследования

Натурный эксперимент проводился с использованием виброанализатора «Вибран-3.2» по методу 100.3 из ГОСТ 30630.1.1–99 «Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Определение динамических характеристик конструкции». Используемые датчики – 352С04.

Образцы для экспериментов изготавливались согласно ГОСТ 8645–68 из стержней прокатного профиля. Материал образцов – сталь Ст3пс.

Стержни жестко защемлялись одним концом. В одной из точек закреплялась нить с грузом массой 4 кг. В дальнейшем нить разрезалась и фиксировались частоты собственных колебаний. Трещина моделировалась как разрез шириной 1 мм.

На верхней стороне испытуемого стержня устанавливались магнитные датчики, а кабели от них закреплялись на подвесе. Подвес необходим для исключения влияния массы провода на колебательную систему. Датчики подключались к портам виброанализатора «Вибран-3.2» в порядке нумерации.

С помощью виброанализатора производилась запись колебаний по четырем каналам в задаваемом временном интервале с ручным запуском. Данные с виброанализатора переносились на ПК. С помощью специального программного обеспечения строились графики колебаний и спектральные графики.

Так как виброанализатор имеет определенную чувствительность, исследовались первые четыре формы колебаний и определялись места нахождения зон максимальных отклонений точек оси балки от положения статического равновесия (рис. 1). Для определения этих точек для каждой формы были исследованы дифференциальные уравнения колебаний тонкостенной балки. В отличие от существующих методик исследований колебаний балок в данном случае учитывалось внутреннее трение [6], что позволило уточнить места расположения точек с помощью специально созданной для этих целей программы.

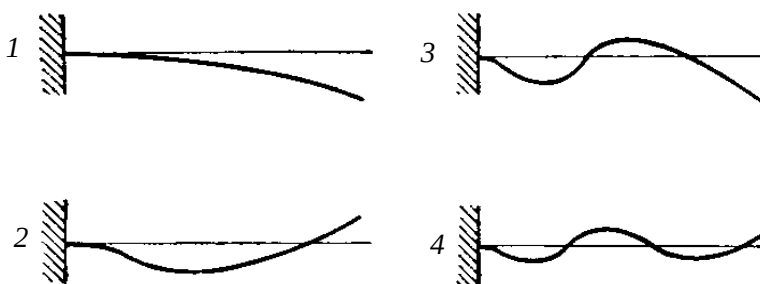


Рис. 1. Формы колебаний консольной балки (номер соответствует номеру формы изгибных колебаний)

Для каждого образца было проведено по 30 измерений. Сначала проводился замер колебаний балки без трещины, по 3 измерения в 2 диапазонах

частот. Далее на указанном расстоянии для конкретной балки делался пропил глубиной $h = 25$ мм, для которого также проводилось по 3 замера в 2 диапазонах частот. Затем пропил углублялся с шагом 25 мм до достижения глубины 100 мм. Данные операции производились для каждого стержня.

Рез, моделирующий трещину, представлен на рис. 2.



Рис. 2. Моделирование трещины в натурном эксперименте

Для численного эксперимента применялась система AutodeskInventor. Создавалась твердотельная модель стержня (рис. 3). Один конец стержня фиксировался от перемещений и поворотов. Размеры трещин и стержня принимались как в натурном эксперименте. В модели учитывались датчики, применяемые в натурном эксперименте, как массы, влияющие на амплитудно-частотные характеристики.

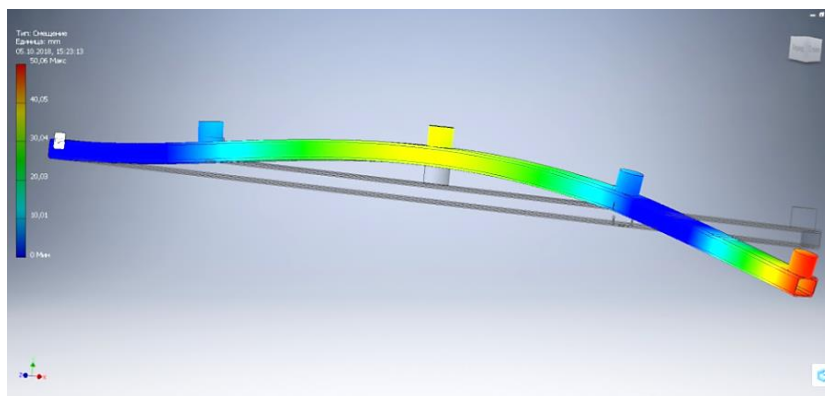


Рис. 3. Модель стержня с датчиками в AutodeskInventor

Результаты эксперимента

Обработанные экспериментальные результаты представлены в виде графиков (рис. 4–7) отклонения частот колебаний ω в зависимости от относительного расположения трещины a (отношения расстояния от трещины до заделки к длине стержня) и ее глубины h .

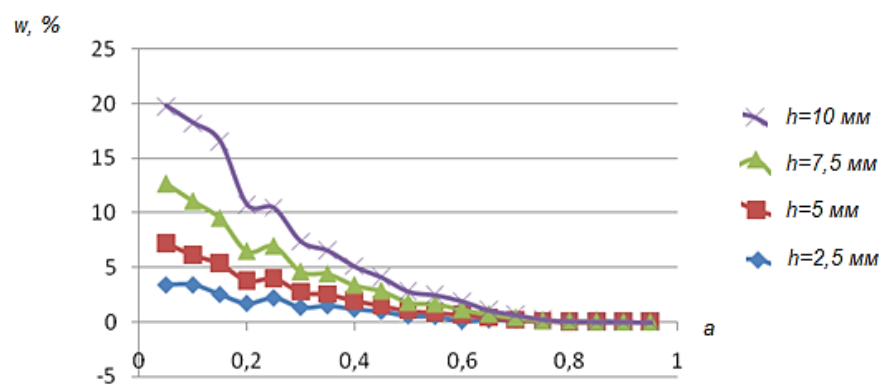


Рис. 4. Значения отклонения частоты первой формы колебаний

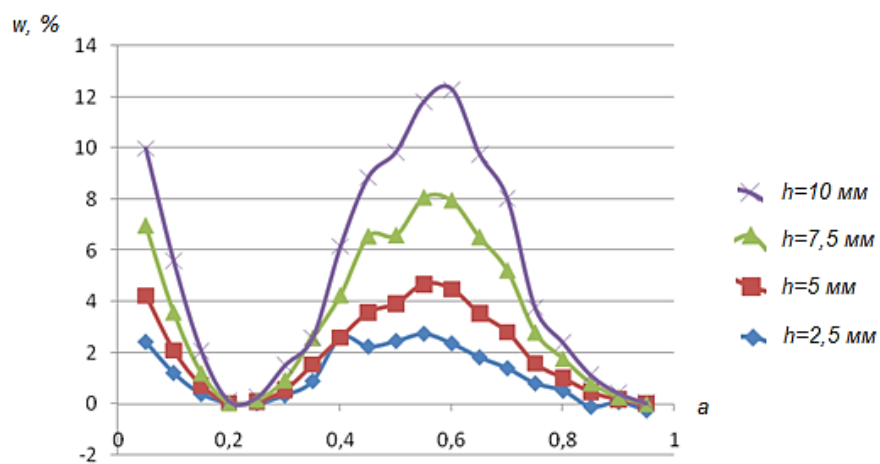


Рис. 5. Значения отклонения частоты второй формы колебаний

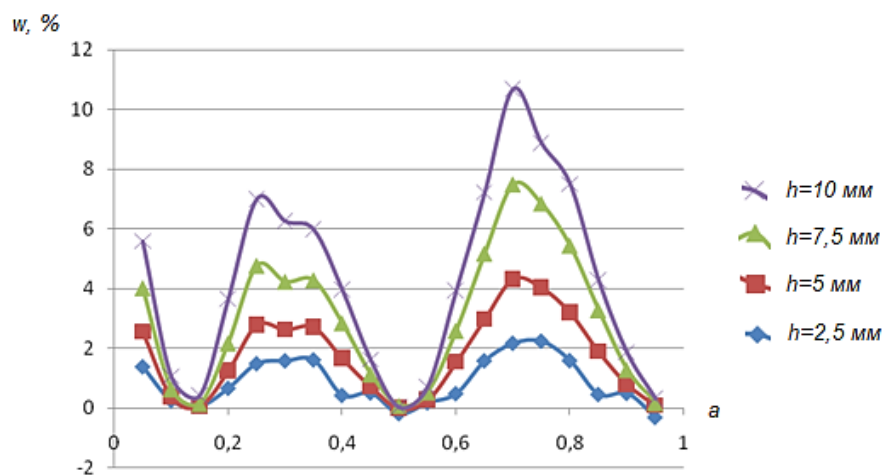


Рис. 6. Значения отклонения частоты третьей формы колебаний

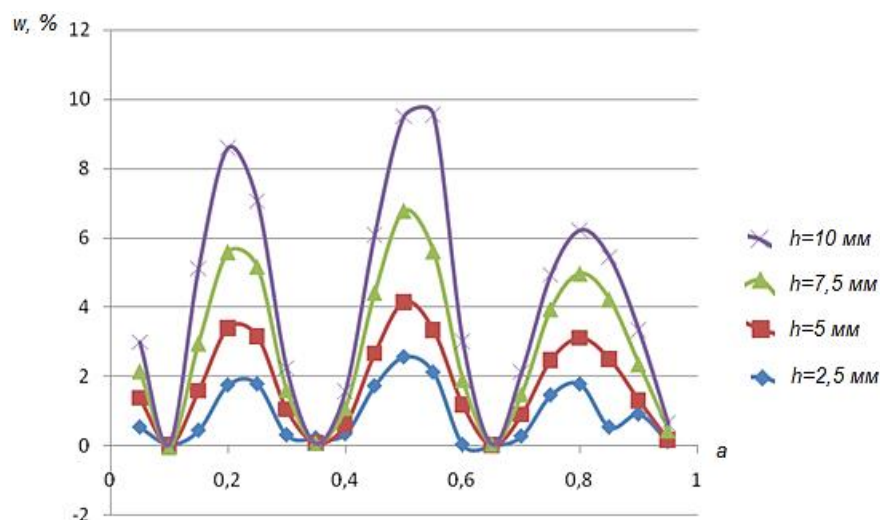


Рис. 7. Значения отклонения частот четвертой формы колебаний

Как видно из графиков, при расположении трещины в зоне «перегиба» формы получены нулевые значения отклонений, т. е. наличие трещины не влияет на форму колебаний.

Анализ показал, что расхождение между результатами численного и натурного экспериментов для решаемой задачи не превышает 12 %. При этом максимальная разница соответствует 4-й форме колебаний при разрезе на расстоянии 0,1 длины от свободного конца стержня. Остальные значения лежат в диапазоне до 8 %.

Для прогнозирования значения собственной частоты колебаний (ν) в зависимости от места появления и глубины трещины уравнение представлялось в виде

$$\nu = A_1 + (A_2 + A_3x + A_4y)\sin(A_5x + A_6), \quad (1)$$

где x – место расположения трещины как относительная величина, $x = (0 \dots 1)$; y – глубина трещины, выраженная как относительная величина, $y = (0 \dots 0,5)$; A_i – коэффициенты.

В результате для каждой из четырех форм были получены значения коэффициентов и сведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов для определения форм колебаний

Номер коэффициента	Значения коэффициентов для форм колебаний			
	1-я форма	2-я форма	3-я форма	4-я форма
1	19,19	116,0	327,5	603,9
2	1,259	1,199	-13,67	1,896
3	-18,22	-0,4168	21,43	-1,624
4	22,49	5,074	13,56	21,41
5	0,1991	9,890	11,79	21,30
6	175,8	137,3	102,8	188,6

Для определения местоположения трещины проводился регрессионный анализ. При этом устанавливалась зависимость места расположения трещины от отклонений частот первых низших четырех форм колебаний в виде полинома:

$$x = B_{ij} w_i w_j. \quad (2)$$

Здесь $i, j = (0, 1, 2, 3, 4)$ – порядковые номера частоты, для значения «0» принимается $w_0 = 1$.

В табл. 2 приведены коэффициенты B_{ij} для полинома и для сравнения – коэффициенты линейной регрессии.

Таблица 2

Значения коэффициентов в полиноме с учетом двух множителей

Индекс коэффициента	Значения для полинома	Значения для случая линейной регрессии
0	1	0,7793
1	–0,0993	–0,0389
2	–0,0069	–0,0059
3	–0,0386	–0,0028
4	–0,0126	–0,0059
11	0,0040	–
22	–0,0019	–
33	–0,0023	–
44	–0,0002	–
12	–0,0036	–
13	0,0033	–
14	–0,0016	–
23	0,0058	–
24	0,0030	–
34	0,0041	–

Максимальная среднеквадратичная ошибка определения положения трещины при использовании линейной регрессии составила 2,3 %. Использование полинома (1) позволило снизить ошибку определения положения трещины до 0,2 % по длине балки.

Заключение

Таким образом, необходимо отметить, что разница между результатами численного и натурного экспериментов при определении частот собственных колебаний тонкостенного стержня, имеющего смоделированную трещину, не превышает 12 %, что свидетельствует о том, что данное моделирование трещин при численном эксперименте является допустимым.

При наличии трещины в зоне «перегиба» определенной формы колебаний влияние трещины на изменение частоты колебаний для данной формы является незначительным.

Установленные варианты полиномиальной зависимости места расположения модели трещины от частот первых низших четырех форм колебаний стержня с моделью трещины могут быть использованы для анализа положения трещин в консольных балках. Дальнейшее развитие рассматриваемого подхода видится в установлении подобных зависимостей для балок при разном закреплении с введением поправочных коэффициентов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fernández-Sáez J., Morassi A., Pressacco M., Rubio L. Unique determination of a single crack in a uniform simply supported beam in bending vibration // *Journal of Sound and Vibration*. 2017. V. 371. P. 94–109.
2. Ахтямов А.М., Каримов А.Р. Диагностирование местоположения трещины по собственным частотам продольных колебаний // *Техническая акустика*. 2010. Т. 10. С. 3.
3. Chuanchuan Hou, Yong Lu. Identification of cracks in thick beams with a cracked beam element model // *Journal of Sound and Vibration*. 2016. V. 385. P. 104–124.
4. Дербасов А.Н. Конечно-элементная вибродиагностика конструкций с трещиной // *Транспортные системы*. 2017. № 1 (4). С. 49–55.
5. Khassestarash A., Hassannejad R. Energy dissipation caused by fatigue crack in beam-like cracked structures // *Journal of Sound and Vibration*. 2016. V. 363. P. 247–257.
6. Gavrilov A., Grebenyuk G., Morozov N., Grehov A. Free Vibrations of Thin-Walled Box-Section Bars Allowing for Shear Strains // *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. V. 7. I. 2. № 13. P. 7–12.

REFERENCES

1. Fernández-Sáez J., Morassi A., Pressacco M., Rubio L. Unique determination of a single crack in a uniform simply supported beam in bending vibration. *Journal of Sound and Vibration*. 2017. V. 371. Pp. 94–109.
2. Akhtyamov A.M., Karimov A.R. Diagnostirovanie mestopolozeniya treshchiny po sobstvennym chastotam prodol'nykh kolebaniy [Crack location diagnosis by natural frequencies of longitudinal oscillations]. *Tekhnicheskaya akustika*. 2010. V. 10. P. 3. (rus)
3. Chuanchuan Hou, Yong Lu. Identification of cracks in thick beams with a cracked beam element model. *Journal of Sound and Vibration*. 2016. V. 385. Pp. 104–124.
4. Derbasov A.N. Konechno-elementnaya vibrodiagnostika konstruksii s treshchinoi [Finite element vibration analysis of cracked structure]. *Transportnye sistemy*. 2017. No. 1 (4). Pp. 49–55. (rus)
5. Khassestarash A., Hassannejad R. Energy dissipation caused by fatigue crack in beam-like cracked structures. *Journal of Sound and Vibration*. 2016. V. 363. Pp. 247–257.
6. Gavrilov A., Grebenyuk G., Morozov N., Grehov A. Free Vibrations of thin-walled box-section bars allowing for shear strains. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. V. 7. No. 2.13. Pp. 7–12.

Сведения об авторах

Гаврилов Александр Александрович, канд. техн. наук, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, pialex@bk.ru

Гребенюк Григорий Иванович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, greb@sibstrin.ru

Максак Владислав Иванович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Морозов Николай Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13.

Authors Details

Aleksandr A. Gavrilov, PhD, Orenburg State University, 13, Pobedy Ave., 460000, Orenburg, Russia, pialex@bk.ru

Grigorii I. Grebenyuk, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, greb@sibstrin.ru

Vladislav I. Maksak, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

Nikolai A. Morozov, PhD, A/Professor, Orenburg State University, 13, Pobedy Ave., 460000, Orenburg, Russia.

УДК 624.05/07

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-65-78

*Е.А. МЕЛЁХИН,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

МОДУЛЬНЫЕ ТРЁХГРАННЫЕ ФЕРМЫ ПЛОСКИХ ПОКРЫТИЙ

Рассматриваются модульные трёхгранные фермы плоских покрытий зданий с поперечным членением на отправочные модули. Отмечены особенности конструкций монтажных узлов сопряжения смежных модулей. Применение модульной системы ориентировано на массовое производство. Доставка модулей осуществляется различным грузовым транспортом. Приведены основные положения геометрического расчёта транспортировки модулей и пример использования транспорта, оснащенного крановой установкой.

Представлены вариативные расчётные модели модулей трехгранной фермы, и обобщены результаты их статических расчётов. Учтены различные пространственные положения и значения собственного веса элементов.

По результатам оценки деформативности обоснована установка дополнительных временных и постоянных элементов. Предложены технологические решения по монтажу конструкций покрытий. Рассмотрены технические решения по обеспечению конструктивной жёсткости, сохранности модулей при монтаже, складировании и безопасной транспортировке.

Ключевые слова: трёхгранная ферма; компоновка модульной системы; статические и геометрические расчёты; оценка деформативности модулей; монтаж и безопасная транспортировка.

Для цитирования: Мелёхин Е.А. Модульные трёхгранные фермы плоских покрытий // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 65–78.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-65-78

*Е.А. MELEKHIN,**Tomsk State University of Architecture and Building*

MODULAR TRIHEDRAL TRUSSES OF FLAT ROOFS

The paper considers modular trihedral trusses of flat roofs for buildings with transverse division into pre-fabricated elements. The use of modular system is oriented to the mass production. The modular system delivery is carried out by various cargo vehicles. The main geometry calculations are given for the transportation modules and vehicles equipped with a crane.

Variable design models of the trihedral truss modules are presented herein as well as the results of their static analysis. The different spatial positions and element's own weight values.

Based on the results of the deformability assessment, the installation of additional temporary and permanent elements is substantiated. The engineering solutions are suggested for mounting the flat roof structures. Technical solutions are considered to provide the structural rigidity, module safety during the installation, storage and safe transportation.

Keywords: trihedral truss; modular system; component arrangement; static and geometry calculations; module deformability; safe installation and transportation.

For citation: Melekhin E.A. Modul'nnye trekhgrannnye fermy ploskikh pokrytii [Modular trihedral trusses of flat roofs]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo

arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 2. Pp. 65–78.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-65-78

Введение

При современном уровне развития строительного производства пространственно-стержневые системы на основе использования трёхгранных ферм (ТГФ) имеют большие перспективы развития и применения в покрытиях зданий и сооружений средних и больших пролётов. Область применения конструкций из трёхгранных ферм предусматривает их использование в качестве покрытий выставочных павильонов и демонстрационных залов, крытых катков, плавательных бассейнов, большепролетных общественных и производственных зданий. Это обусловлено стремлением использования их производственно-технологического потенциала для возведения практически в любом географическом районе строительства вне зависимости от уровня развития существующей производственной инфраструктуры.

В настоящее время перспективные разработки, существующие технические решения, патентные разработки конструкций покрытий из трёхгранных ферм позволяют рассматривать их как обособленный подкласс пространственно-стержневых систем [1–4]. Следует признать, что из большого числа существующих разработок обоснованный интерес к внедрению могут представлять только технические решения, которые обладают производственно-технологическим потенциалом. В его основе рассматриваются: высокая степень проектной и конструктивной проработки, простота изготовления и монтажной сборки, высокая степень подготовки к безопасной транспортировке и складированию, а также непротивительные требования к производственной инфраструктуре изготовления.

Целенаправленное совершенствование конструктивных форм ТГФ, методов их расчёта, монтажа, доставки позволит обеспечить эффективную и безопасную эксплуатацию в течение всего срока их службы.

В основу перспективных и существующих разработок трёхгранных ферм из прокатных профилей с поясами составного сечения положены результаты экспериментальных и теоретических исследований [5–9].

Плоские покрытия зданий из трёхгранных ферм с бесфасоночными узлами сопряжения относятся к эффективным пространственно-стержневым системам ввиду высоких технико-экономических показателей. Низкая удельная материалоёмкость, а также при обеспечении определённых условий и низкая трудоёмкость изготовления ТГФ обусловлены рациональным использованием материала конструктивной формы несущей системы на основе применения элементов из индустриально развитых и освоенных прокатных и гнутых профилей.

Транспортная поставка конструкций трёхгранных ферм может осуществляться поэлементной доставкой («россыпью») с последующей укрупнительной монтажной сборкой на строительной площадке. Однако преимущественным и наиболее рациональным решением, позволяющим существенно расширить применение данных конструкций, является поставка отправочных модулей ТГФ полной заводской готовности автотранспортом общего назначения.

Обязательным этапом обоснования экономической эффективности массового применения трёхгранных ферм является анализ результатов проектных решений конструктивной компоновки их транспортировки и складирования.

Конструкция трёхгранной фермы

Геометрическая схема ТГФ представляет собой многоэлементную пространственно-стержневую систему с продольными поясами и раскосной решёткой.

Трёхгранный контур сечения пространственной системы формируется тремя плоскими фермами, смежные из которых объединены между собой общим поясом и общими узлами сопряжения элементов раскосной решётки (рис. 1).

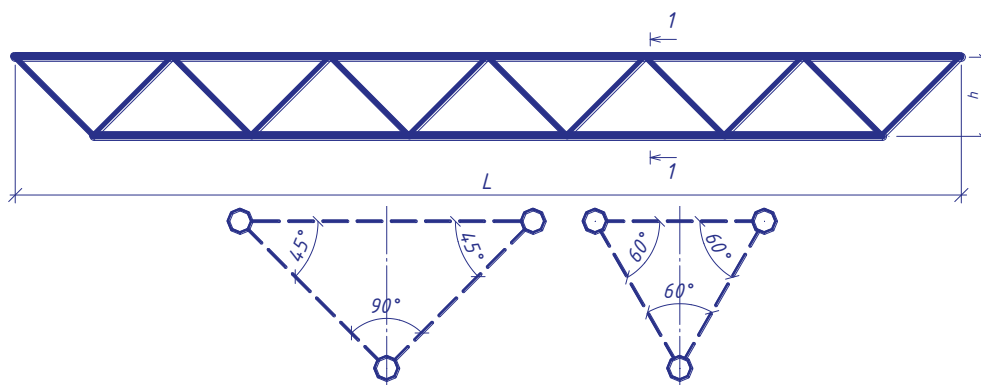


Рис. 1. Трёхгранные фермы с различными углами сопряжения плоских ферм

Многообразие конструктивных форм трёхгранных ферм определяется существующим разнообразием плоских стержневых ферм и их конструктивными комбинациями в сочетании с возможностью компоновки обобщающих узлов сопряжения.

При формировании конструктивной формы трёхгранной фермы учитываются особенности её статической работы, характер распределения внутренних усилий при различных сочетаниях действующих нагрузок. В пролётных конструкциях трёхгранных ферм целесообразно использовать только две наклонные фермы (рис. 2).

Данное компоновочное решение обосновано результатами оценки напряжённо-деформированного состояния ТГФ с различными геометрическими параметрами и сочетания действия нагрузок. Установлено незначительное влияние на несущую способность воздействий в горизонтальном направлении (из плоскости изгиба) по сравнению с влиянием воздействий в вертикальном направлении (в плоскости изгиба). Поэтому для обеспечения конструктивной жёсткости пролётных конструкций ТГФ достаточно установки горизонтальных затяжек в узлах верхнего пояса либо использования в этом качестве поперечных прогонов кровельного покрытия. При беспрогонном решении конструкции кровельного покрытия возможно использовать в качестве затяжек несущий профилированный настил (рис. 3).

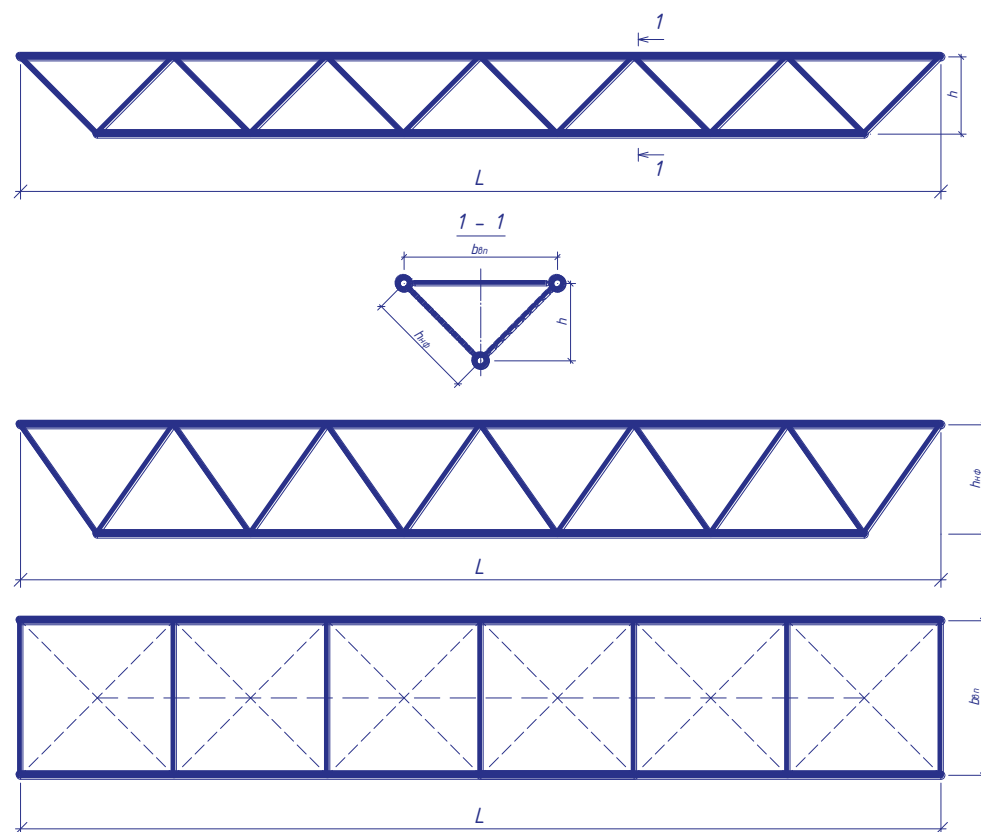


Рис. 2. Геометрическая схема конструкции пролётной трёхгранной фермы

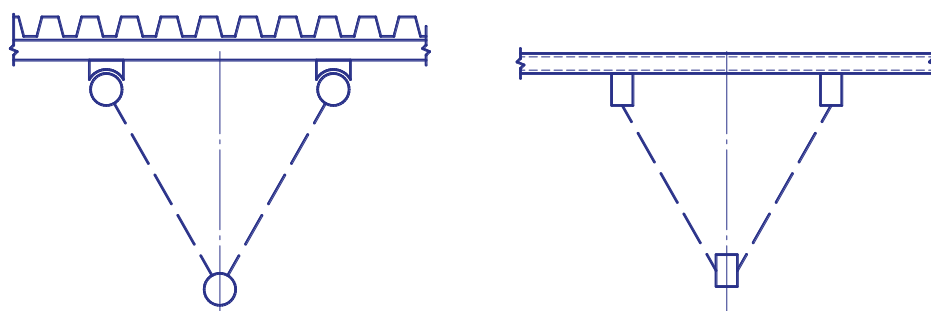


Рис. 3. Сечения трёхгранных ферм из круглых труб с прогонной кровлей и из прямоугольных труб с беспрогонной кровлей

Возможность исключения затяжек из состава конструкции пространственной фермы позволяет использовать пространство между наклонными фермами при транспортировке модулей с укладкой «в ёлочку». Однако это сопровождается снижением конструктивной жёсткости модуля, что необходимо учитывать при транспортировке, складировании и монтаже.

Компоновка модульной системы трёхгранных ферм

Модульная система образуется путем поперечного членения конструкции трёхгранной фермы на отправочные марки, отличающиеся высокой типизацией и унификацией. Модулем представляется фрагмент трёхгранной фермы конструкции покрытия, увязанный с габаритами грузовой площадки транспорта перевозки и обладающий достаточной жёсткостью для его транспортировки и складирования (рис. 4). Поперечное членение конструкции пространственной трёхгранной фермы осуществляется в узлах верхних поясов и панели нижнего пояса из условия образования минимального количества монтажных стыковочных узлов. В этом случае целесообразно выделить панели нижнего пояса в качестве доборного элемента (рис. 5).

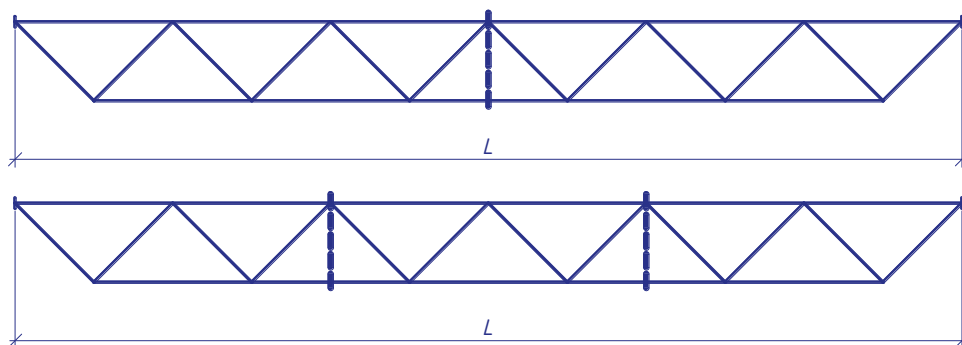


Рис. 4. Варианты поперечного членения трёхгранной фермы по длине

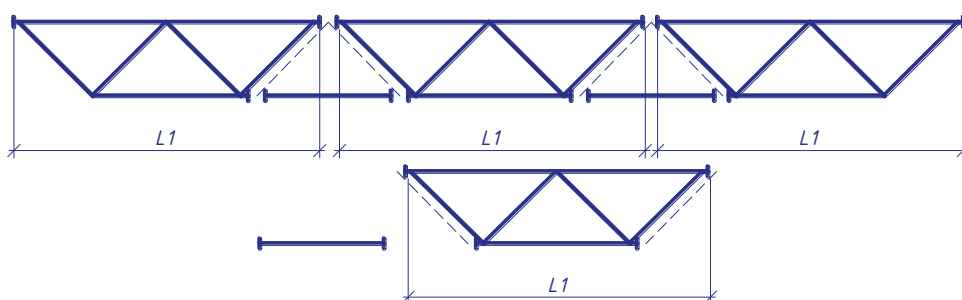


Рис. 5. Формирование модульной системы трёхгранной фермы

Следует отметить, что наличие доборных элементов нижнего пояса при компоновке конструктивных систем позволяет не только обеспечить устройство строительного подъёма для плоских покрытий, но и реализовать возможность формирования иных конструктивных форм покрытий – двускатных, многоскатных сегментированных или арочных.

Особенности монтажных бесфасоночных узлов трёхгранных ферм

Конструктивное решение сопряжения смежных модулей осуществляется посредством устройства фланцевых соединений на высокопрочных болтах, предусмотренных в конструкции бесфасоночных узлов сопряжения (рис. 6).

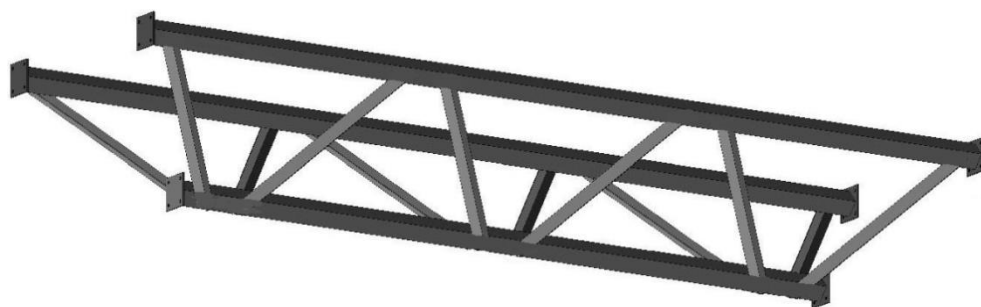


Рис. 6. Модуль трёхгранной фермы пролётной конструкции

Компоновка таких узлов имеет свои конструктивные особенности, обусловленные размещением пластин фланцев в торцевых частях стержней поясов и сварных швов их крепления. Также следует учитывать наличие возможных ограничений, обусловленных размещением раскосных элементов и сварных швов их крепления на полках поясных стержней, необходимости удобного размещения и монтажной постановки высокопрочных болтов фланцев [8].

При беспрогонном кровельном покрытии из профилированного настила, укладываемого непосредственно по верхним поясам, целесообразно использовать конструктивные решения узлов с расположением фланцев в уровне граней стержней верхних поясов либо необходимо проверять геометрическим расчётом компоновку расположения стыковых фланцев модулей при раскладке профилированного настила для обеспечения расположения пластин фланца в высоте полости гофра профнастила.

Введение пластин фланцев в конструкцию бесфасоночных узлов сопровождается необходимостью изменения геометрических размеров как в конструкции самих монтажных стыковых узлов модулей, так и в конструкции стержневой системы в целом. Подобные геометрические преобразования на этапе конструирования в основном приводят к необходимости компоновки нецентрированных узлов [8, 9].

Транспортная подготовка и доставка

Доставка автотранспортом поддерживает возможность широкой географии применения покрытий из трёхгранных ферм в сочетании с высоким качеством заводского изготовления модулей, оставляя на строительной площадке только укрупнительную сборку. Транспортировка модулей трёхгранных ферм может осуществляться различными видами транспорта при обеспечении основных показателей транспортабельности груза [10].

Основным показателем эффективности использования автотранспорта является себестоимость перевозки, которая уменьшается по мере увеличения степени загрузки, определяемая в виде соотношения массы одной конструкции и их одновременно перевозимого количества и общей грузоподъёмности транспорта. При этом правила дорожного движения ограничивают крупногабаритный груз, выступающий за габариты транспортного средства спереди или сзади более чем на 1 м или сбоку более чем на 0,4 м от внешнего края га-

баритного огня⁶. Перевозка крупногабаритного груза связана с увеличением организационных издержек и повышением расходов на транспортировку специализированной техникой. Поэтому целесообразно совершенствовать и развивать конструкции трёхгранных ферм в виде их модульных систем с транспортной подготовкой для доставки грузовым транспортом общего назначения.

Конструктивная форма трёхгранных ферм позволяет производить компоновку транспортировки и складирования модулей друг на друга со взаимным пространственным размещением во внутренних полостях смежных конструкций, или, иначе, «в ёлочку» (рис. 7).

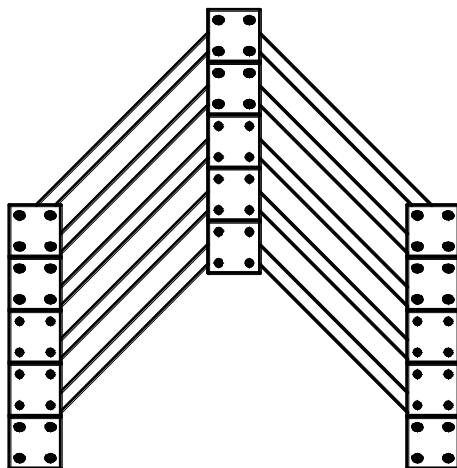


Рис. 7. Компоновка транспортировки и складирования модулей «в ёлочку»

Так, для повышения автономности доставки можно использовать грузовой транспорт с крановой установкой, позволяя не привлекать грузоподъемные механизмы склада и строительной площадки к погрузке и разгрузке.

Например, бортовой грузовик марки КамАЗ-65117-62 с манипулятором может использоваться в качестве основного автотранспорта доставки и укрупнительного монтажа (рис. 8).

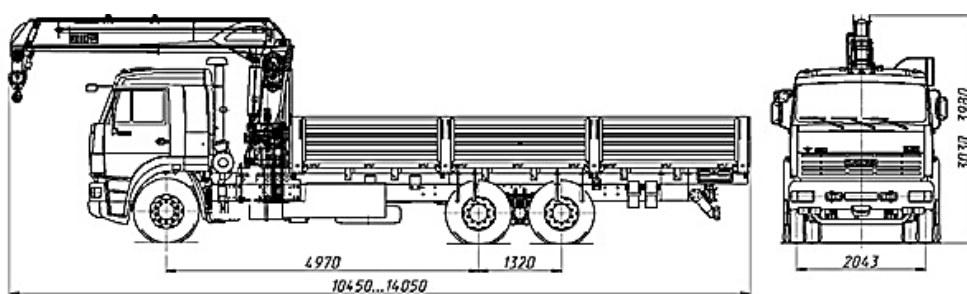


Рис. 8. Геометрические размеры автотранспорта доставки и сборки

⁶ Правила дорожного движения РФ, действующие с 08 апреля 2021 г., п. 23.4.

Габариты его грузовой платформы, включая допуски по свесам при транспортировке, подходят для перевозки большинства модулей конструкций трёхгранных ферм высотой до 1,5 м с прямым углом сопряжения наклонных ферм (пролёт 24 м), высотой до 2,7 м с углом сопряжения наклонных ферм 60° (пролёт 36 м).

При складе в «ёлочку» необходимо обеспечить целостность конструктивных элементов модуля и их защитного лакокрасочного покрытия. Для этого предлагается каждый модуль оснащать временными торцевыми затяжками из брусков древесины с креплением на болтах. Тем самым решаются задачи по повышению конструктивной жёсткости модуля при транспортировке и монтаже с сохранением проектных габаритов, а также по формированию опорных элементов при складе модулей в «ёлочку» (рис. 9).



Рис. 9. Устройство торцевых затяжек модуля трёхгранной фермы (положение модуля при доставке и складировании)

Так размер высоты деревянного бруска затяжки должен быть подобран из условия обеспечения зазора между смежными (по высоте) модулями, способствуя тем самым сохранению механической целостности элементов и их защитного лакокрасочного покрытия.

Соответственно высота торцевой затяжки должна быть не меньше высоты пластины фланца стыкового узла модулей и окончательно установлена в соответствии с сортаментом пиломатериала. Допускается использовать спаренные по высоте бруски с временным креплением к фланцам на болтах.

Размер толщины бруска должен быть подобран из условия несущей способности болтовых соединений по критерию смятия древесины на воздействие максимального усилия распора при транспортировке и монтаже. Минимальное значение толщины брусков затяжки установлено равным 60 мм.

Размер максимальной длины затяжки устанавливается из условия габарита ширины отправочного модуля.

Геометрический расчёт транспортной компоновки модульной системы

Компоновочный расчёт склада модулей трёхгранной фермы «в ёлочку» сводится к определению возможности их размещения в заданном транспортном объёме в сопоставлении с грузоподъёмностью транспорта. Габариты транспортного объёма являются граничными условиями для геометрической компоновки модулей, суммарный вес – граничным условием грузоподъёмности. Длина и ширина модуля определяются результатом поперечного члене-

ния трёхгранной фермы по панелям поясов с учётом особенностей расположения поясов наклонных ферм в поперечной плоскости, размерами стыковочных узлов. Количество модулей, укладываемых «в ёлочку» для перевозки, ограничивается предельной высотой и грузоподъёмностью транспорта.

Условия геометрического расчёта размещения модулей складом «в ёлочку» выражаются следующим образом:

$$L_M \leq L_{гп};$$

$$B_M = b_0 + c_{y,B} \leq B_{гп};$$

$$H_M = h_0 + c_{y,H} \leq H_{гп};$$

$$N_M \leq (H_{гп} - h_0 - c_{y,H}) / (c_{y,H}) + 1,$$

где L_M, B_M, H_M – габариты модуля: длина, ширина, высота; $L_{гп}, B_{гп}, H_{гп}$ – максимальные габариты грузовой площадки с учётом разрешённых допускаемых транспортных свесов: длина, ширина, высота; $c_{y,B}, c_{y,H}$ – габариты стыковых узлов в обозначенных ортогональных плоскостях ширины (B) и высоты (H) модуля; при использовании временных затяжек учитываются их геометрические характеристики; b_0, h_0 – осевое расстояние между поясами модуля по ширине и высоте; N_M – целое число количества модулей.

Расчёт транспортного груза модулей трёхгранной фермы «в ёлочку» сводится к сопоставлению с грузоподъёмностью транспорта:

$$N_M \cdot G_M \leq G_{гп},$$

где G_M – масса модуля; N_M – количество модулей; $G_{гп}$ – грузоподъёмность транспортной площадки (транспорта).

Таким образом, компоновка модульной системы трёхгранных ферм увязывается с габаритами площадки транспорта общего назначения в сопоставлении с его грузоподъёмностью.

Статические расчёты модуля трёхгранной фермы

Целью статических расчётов ставился анализ деформативности разработанной конструкции модуля трёхгранной фермы комбинационного состава стержневой системы при его складировании, доставке, перемещении подъёмом и кантовании.

Полученные результаты численных исследований являются основой для последующего решения технологических задач монтажной сборки и обоснованием необходимости установки временных затяжек обратного применения, выполненных из брусков древесины.

В расчётных схемах вариативных пространственно-стержневых моделей учитывалось воздействие от собственного веса модуля проектной конструкции трёхгранной фермы в различных пространственных положениях.

Соответственно в основе вариативности рассматривалась различная компоновка обоснованного расчетом состава стержневых элементов конструкции: пояса из трубчатых элементов различного профиля, из уголкового профиля, раскосы из уголкового профиля различных размеров.

Для сравнительного анализа и решения задач поставленной цели рассматривались две расчётные пространственно-стержневые модели, учитывающие наличие и отсутствие торцевых затяжек модулей (рис. 10).

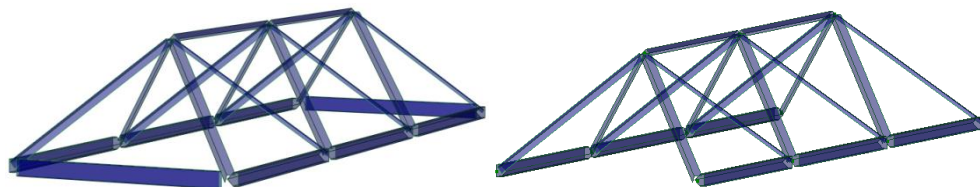


Рис. 10. Расчётные модели конструкции модуля трёхгранной фермы

В основу двух расчётных моделей принималась общая конструкция модуля проектной трёхгранной фермы с габаритами $9 \times 3 \times 1,5$ м, расположенного в составе пролётной конструкции плоского покрытия отапливаемого здания IV снегового района. Для рационального сокращения числа вариационных моделей при оценке воздействия только от собственного веса достаточно принять конструкцию модуля с наибольшей массой и наибольшими габаритами. При этом необходимо учесть, что значение массовой доли поясных стержней в составе пролётной конструкции модуля является переменной величиной, так для рассматриваемого модуля данное значение составляло около $0,75 \pm 0,05$.

При выборе поясных стержней рассматривались трубчатые пятигранные профили, составленные из прокатного швеллера и равнополочного уголка, стержни раскосной решётки – соответственно из прокатных равнополочных уголков. В текущей расчётной задаче варьировался только состав элементов раскосной решетки, который характерен для приопорных модулей пролётных конструкций трёхгранных ферм.

Оценка напряженно-деформированного состояния модуля при перемещении его подъёмом и кантованием в проектное положение проводилась на воздействие расчётной нагрузки от собственного веса с коэффициентом надёжности по нагрузке $\gamma_m = 1,05$ и с коэффициентом динамичности $\gamma_d = 1,2$ из условия пропорциональности реактивного воздействия крановой нагрузки.

Граничные условия расчётной стержневой модели учитывали несколько вариантов пространственного положения модуля – от перемещения подъёмом из транспортного положения до кантования с двухузловым и четырехузловым захватом по узлам нижнего и верхних поясов.

Результаты статического расчёта

Сравнительный анализ результатов статических расчётов двух вариационных моделей с одинаковым составом элементов модулей для их сопоставления показал:

- поперечная конструктивная жёсткость модуля трёхгранной фермы без использования торцевых затяжек определяется только жёсткостью бесфасонных узлов сопряжения элементов раскосной решётки и нижнего пояса, являющегося общим для двух наклонных ферм;
- деформативность модуля зависит от его пространственного положения, собственной массы элементов поясов и раскосной решетки и определяется в основном изменением расстояния между узлами смежных верхних поясов и угла между наклонными фермами;
- при перемещении, кантовании и складировании наиболее деформативными являются модули трёхгранных ферм с нижним поясом, выполненным из одиночного уголка;
- оценка несущей способности бесфасонных узлов сопряжения по нижнему поясу, выполненному из одиночных уголков, должна быть подтверждена дополнительным расчётом на воздействие поперечного изгибающего момента от собственного веса наклонных ферм;
- следовательно, целесообразно производить проверку узлов нижнего пояса, в состав которых входят элементы раскосной решетки с наименьшим суммарным значением моментов инерции стержней в поперечной плоскости;
- установка временных затяжек снижает деформативность модуля практически в 2,5 раза и исключает необходимость дополнительной проверки несущей способности бесфасонных узлов;
- установка дополнительных деталей в узлах нижнего пояса из одиночного уголка в виде пластин с приваркой по перьям позволяет сформировать конструктивную жесткость узла и исключает необходимость дополнительной проверки несущей способности бесфасонных узлов.

Основные выводы и рекомендации

По результатам комплексных исследований сформулированы основные выводы и рекомендации:

- использование временных затяжек предполагает увеличение трудоёмкости и материалоёмкости на этапе подготовки модулей к их транспортировке, однако упрощает процесс укрупнительной сборки, обеспечивает безопасность транспортировки и сохранность целостности элементов модулей;
- для модулей трёхгранных ферм с прогонной системой кровельного покрытия установка прогонов может осуществляться непосредственно из положения транспортировки с последующим продольным кантованием для монтажной установки в проектное положение;
- устройство временных торцевых затяжек определяет достаточную поперечную конструктивную жёсткость модуля и позволяет гарантированно обеспечить его сохранность и целостность при транспортировке, кантовании и укрупнительном монтаже;
- наличие временных торцевых затяжек исключает необходимость в проведении дополнительных проверок по обеспечению несущей способности узлов на воздействие нагрузок в период монтажа и транспортировки;
- для модулей трёхгранных ферм с беспрогонной системой кровельного покрытия требуется обязательная установка постоянных (стационарных) за-

тяжек, обеспечивающих поперечную конструктивную жёсткость модулей при продольном кантовании и укрупнительном монтаже;

– применение грузоподъёмных траверс, предназначенных для исключения или снижения значения горизонтального усилия, возникающего между узлами захватов строп при подъёме груза, не требуется, вполне достаточно использования приспособленного устройства захватов в местах установки фланцев.

Заключение

Перспективное развитие конструкций покрытий из трёхгранных ферм, повышение эффективности их применения и расширение районов строительства заключается как в научно-практической основе их изучения, так и в детальной проектной проработке технологических процессов массового производства, возведения и эксплуатации.

Модульные системы трёхгранных ферм позволяют реализовать массовое производство эффективных конструкций покрытий высокого качества заводского изготовления, осуществлять доставку практически любым видом грузового транспорта с возможностью рационального использования его грузоподъёмности в отдаленные районы строительства.

Геометрическим расчётом подтверждена возможность транспортировки и складирования модулей трёхгранных ферм «в ёлочку». Наличие временных торцевых затяжек позволяет обеспечить конструктивную жёсткость модуля. Помимо этого, практическая значимость в использовании торцевых затяжек заключается в обеспечении безопасной транспортировки модулей на значительные расстояния от места заводского производства, удобном кантовании и высокой сохранности конструкции в процессе доставки.

Анализ теоретических исследований пространственно-стержневых конструкций трёхгранных ферм с бесфасонными узлами сопряжения позволил обосновать возможность и целесообразность конструктивной компоновки модульной системы поперечного членения. Также обоснована необходимость обязательной установки постоянных (стационарных) затяжек, обеспечивающих поперечную конструктивную жёсткость модулей при продольном кантовании и укрупнительном монтаже, для конструкций трёхгранных ферм, предусматривающих устройство беспрогонного кровельного покрытия.

В рамках дальнейшего развития исследований модульных систем трёхгранных ферм массового производства целесообразно проведение оценки применения составных стержней переменной жёсткости на основе единого прокатного уголкового профиля для всех элементов раскосной решётки, а также разработка альтернативных конструктивных решений монтажных узлов сопряжения модулей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент № 2188287 РФ, RU МПК⁷ Е 04 С 3/04. Покрытие из трехгранных ферм : № 2000117116/03 ; заявл. 27.06.2000 ; опубл. 27.08.2002 / Копытов М.М., Ерохин К.А., Матвеев А.В., Мелёхин Е.А., Бюл. № 24.
2. Патент № 49859, RU U1 МПК⁷ Е 04 С 3/04. Покрытие из трехгранных ферм : № 2003120389/22 ; заявл. 03.07.2003 ; опубл. 10.12.2005 / Копытов М.М., Мелёхин Е.А., Матвеев А.В., Бюл. № 3, 4, 10 с.

3. Патент № 2627794. Покрытие из трехгранных ферм : № 2016124898 ; заявл. 21.06.2016 ; опубл. 11.08.2017 / Мелёхин Е.А., Бюл. № 23.
4. Патент № 2661945. Покрытие из трехгранных ферм : заявка № 2017134238 ; заявл. 02.10.2017 ; опубл. 23.07.2018 / Мелёхин Е.А., Фирцева С.В., Бюл. № 21.
5. Ерохин К.А., Мелёхин Е.А., Купряхин А.Н. Методика экспериментального исследования узлов складчатого покрытия // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2000. № 2. С. 123–126.
6. Ерохин К.А., Мелёхин Е.А. К исследованию узлов бесфасоночной пространственной фермы с пятигранным сечением верхнего пояса // Научно-техническая конференция КрасГАСА. Красноярск, 2000. С. 25–27.
7. Мелёхин Е.А. Пластинчатая расчетная модель узла бесфасоночной пространственной фермы // 2-я Международная научно-техническая конференция «Архитектура и строительство», 2002.
8. Мелёхин Е.А. Работа узлов бесфасоночного складчатого покрытия с поясами пятигранного составного профиля : автореферат диссертации кандидата технических наук : 05.23.01. Томск, 2003. 151 с.
9. Мелёхин Е.А. Исследование влияния расцентровки и податливости на напряженно-деформированное состояние узлов сопряжения пространственно-стержневых конструкций покрытий с поясами пятигранного составного профиля из металлопроката // VIII Украинская научно-техническая конференция «Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее». Киев, Украина, 2004. С. 592–595.
10. *Руководство по перевозке автомобильным транспортом строительных конструкций* / Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт организации, механизации и технической помощи строительству (ЦНИИОМТП) Госстроя СССР. Москва : Стройиздат, 1980. 114 с.

REFERENCES

1. Kopytov M.M., Erokhin K.A., Matveev A.V., Melekhin E.A. Pokrytie iz trekhgrannykh ferm [Triangular truss flat roofs]. Patent Russ. Fed. N 2188287, 2002. (rus)
2. Kopytov M.M., Melekhin E.A., Matveev A.V. Pokrytie iz trekhgrannykh ferm [Triangular truss flat roofs]. Patent Russ. Fed. N 49859, 2005. 10 p.(rus)
3. Melekhin E.A. Pokrytie iz trekhgrannykh ferm [Triangular truss flat roofs]. Patent Russ. Fed. N 2627794, 2017. (rus)
4. Melekhin E.A., Firtseva S.V. Pokrytie iz trekhgrannykh ferm [Triangular truss flat roofs]. Patent Russ. Fed. N 2661945, 2018. (rus)
5. Erokhin K.A., Melekhin E.A., Kupryakhin A.N. Metodika eksperimental'nogo issledovaniya uzlov skladchatogo pokrytiya [Experimental study of folded-plate construction assemblies]. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2000. No. 2. Pp. 123–126. (rus)
6. Erokhin K.A., Melekhin E.A. K issledovaniyu uzlov besfasonochnoi prostranstvennoi fermi s pyatigrannym secheniem verkhnego poyasa [Assemblies of sculptured space truss with pentagonal cross-section of upper chord]. In: Nauchno-tehnicheskaya konferentsiya KrasGASA (Proc. Sci. Conf.). Krasnoyarsk, 2000. Pp. 25–27. (rus)
7. Melekhin E.A. Plastinchataya raschetnaya model' uzla besfasonochnoi prostranstvennoi fermi [Plate model of sculptured space truss flat roof]. In: 2-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya "Arkhitectura i stroitel'stvo" (Proc. 2nd Int. Sci. Conf. 'Architecture and Construction'), 2002. (rus)
8. Melekhin E.A. Rabota uzlov besfasonochnogo skladchatogo pokrytiya s poyasami pyatigrannogo sostavnogo profilya : avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk [Work of the nodes of the sculptured folded-plate construction with pentagonal composite profile. PhD Abstract]. Tomsk, 2003. 151 p. (rus)
9. Melekhin E.A. Issledovanie vliyaniya rastsentrovki i podatlivosti na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie uzlov sopryazheniya prostranstvenno-sterzhnevyykh konstrukttsii pokrytii s poyasami pyatigrannogo sostavnogo profilya iz metalloprokata [Effect of misalignment and stress-strain state of rod structure joints of coatings with five-sided composite profile made of rolled metal products]. In: VIII Ukrainskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya

- “Metallicheskie konstruksii: vzglyad v proshloe i budushchee” (*Proc. 8th Ukr. Sci. Conf. ‘Metal Structures: Insight in Past and Future’*). Kiev, Ukraine, 2004. Pp. 592–595. (rus)
10. Rukovodstvo po perevozke avtomobil'nym transportom stroitel'nykh konstruksii [Guidelines for transportation of building structures by automobile transport]. Moscow: Stroiizdat, 1980. 114 p. (rus)

Сведения об авторе

Мелёхин Евгений Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, melean@mail.ru

Author Details

Evgeniy A. Melekhin, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, melean@mail.ru

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.57:699.86

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-79-86

*В.А. ВЛАСОВ, Н.К. СКРИПНИКОВА,
Д.К. ГРИГОРЕВСКАЯ, В.В. ШЕХОВЦОВ,
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВОВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗОЛЬНЫХ МИКРОСФЕР*

Рассмотрены возможности получения теплоизоляционных красок с использованием зольных микросфер в качестве микронаполнителя. Исследовано влияние основных технологических факторов на свойства лакокрасочных материалов, полученных на основе водно-дисперсионного стирол-акрилового латекса Latex DL 424 и смеси зольных микросфер фракции 0,071–0,14 мм и насыпной плотности 371 кг/м³. Установлен оптимальный состав лакокрасочной композиции с учетом возможности получения покрытия требуемого качества. Технический результат эксперимента заключается в повышении прочности и твердости получаемого покрытия за счет интенсивного процесса полимеризации стирол-акрилового латекса в порах зольных микросфер. Выявлено, что образцы также обладают высокой адгезией к керамическому и металлическому основанию, высокой степенью коррозионной стойкости и низким коэффициентом теплопроводности. Помимо этого, использование в композиции полимерного связующего позволяет повысить эластичность покрытия и, как следствие, стойкость к мытью и истиранию. Областью применения полученных образцов теплоизоляционного лакокрасочного материала могут быть различные поверхности стен, потолков, крыш зданий и сооружений, трубопроводов, котлов и т. п.

Ключевые слова: теплоизоляция; теплоизоляционные лакокрасочные материалы; теплопроводность; зольные микросферы; адгезия; стирол-акриловая дисперсия; строительные материалы; энергосбережение.

Для цитирования: Власов В.А., Скрипникова Н.К., Григорьевская Д.К., Шеховцов В.В. Разработка и исследование составов теплоизоляционных лакокрасочных материалов с использованием зольных микросфер // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 79–86.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-79-86

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10102).

V.A. VLASOV, N.K. SKRIPNIKOVA,
D.K. GRIGOREVSKAYA, V.V. SHEKHOVTSOV,
Tomsk State University of Architecture and Building

DEVELOPMENT OF HEAT INSULATING COATINGS COMPRISING ASH MICROSPHERES

The paper considers the production of heat-insulating paints using ash microspheres as a microfiller. It is shown how the technology factors change the properties of paintwork materials based on Latex DL 424 water-dispersion acrylic latex and 0.071–0.14 mm ash microspheres with the bulk density of 371 kg/m³. The optimum composition of paintwork materials is determined with regard to the coating production of the required quality. The experiments result in the increase in the coating strength and hardness due to the intensive polymerization of styrene-acrylic latex in ash microspheres. It is found that the obtained samples also possess high adhesion to ceramic and metal substrates, high corrosion resistance and low thermal conductivity. In addition, the use of the polymer binder in the composition makes allows increasing the coating elasticity and, as a consequence, the resistance to washing and abrasion. The obtained heat-insulating material can be used for various surfaces of walls, ceilings, roofs of buildings and structures, pipelines, boilers, and many others.

Keywords: thermal insulation; heat-insulating paints and varnishes; thermal conductivity; ash microspheres; adhesion; styrene-acrylic dispersion; building materials; energy saving.

For citation: Vlasov V.A., Skripnikova N.K., Grigorevskaya D.K., Shekhovtsov V.V. Razrabotka i issledovanie sostavov teploizolyatsionnykh lakokrasochnykh materialov s ispol'zovaniem zol'nykh mikrosfer [Development of heat insulating coatings comprising ash microspheres]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 2. Pp. 79–86.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-79-86

Одним из приоритетных направлений развития строительной промышленности в наши дни является рациональное использование энергии и снижение ее потребления в сфере жилищно-коммунального комплекса. Особое значение приобретают энергосберегающие технологии обеспечения теплозащиты при строительстве новых и реконструкции уже существующих зданий и сооружений [1].

Как показывает опыт, сокращение теплопотерь при отоплении зданий достигается повышением термического сопротивления ограждающих конструкций путем применения эффективных теплоизоляционных материалов [2–4].

На сегодняшний день на отечественном рынке стройматериалов все большую популярность приобретают теплоизоляционные лакокрасочные материалы. Данные изделия представляют собой композицию, состоящую из полимерного связующего, функциональных добавок и наполнителя. Главными достоинствами теплоизоляционных красок является постоянство теплофизических свойств на всем протяжении срока эксплуатации изделия; простота и возможность нанесения на труднодоступные участки поверхности ограждающих конструкций; исключение протекания коррозии под тепловой изоляцией; пожаробезопасность; экологичность; устойчивость к атмосферному воздействию и др. [5, 6]. Кроме этого, наносить теплоизоляцион-

ные лакокрасочные материалы можно на любой тип поверхности (бетонную, керамическую, деревянную или металлическую). Главным же недостатком данных красок является их цена [7]. Известно, что при производстве теплоизоляционных лакокрасочных материалов многие производители, стремясь достигнуть максимально низких значений коэффициента теплопроводности, в качестве наполнителей используют достаточно дорогие полые стеклянные и керамические микросферы [8–10], что приводит к существенно высокой себестоимости и, как следствие, снижению конкурентной способности выпускаемой продукции [11]. В связи с этим целью настоящей работы является разработка и исследование теплоизоляционного лакокрасочного материала с использованием более дешевого наполнителя – зольных полых микросфер, стоимость которых в 8–10 раз ниже традиционно используемых стеклянных и керамических сфер.

Согласно литературным данным, микронаполнители теплоизоляционных красок обычно имеют диаметр менее 0,071 мм. Для получения покрытий необходимо обеспечить наименьший объем свободного пространства между микросферами, и, как следствие этого, для обеспечения высоких теплозащитных характеристик необходимо использовать смеси полых микросфер разных фракций, соответственно не превышающих допустимых 0,071 мм, и различной насыпной плотностью. При использовании микросфер с близкими фракциями степень заполнения пространства между сферами будет ниже [12–14]. Поэтому при исследовании влияния зольной микросферы на характеристики образцов теплоизоляционного покрытия был заложен принцип минимальной межзерновой пустотности и минимальной средней плотности. Для этого был подобран оптимальный фракционный состав зольных микросфер, равный 0,071–0,14 мм, с насыпной плотностью $\rho_m = 371 \text{ кг/м}^3$.

В ходе работы было отмечено, что на качество наносимых теплоизоляционных покрытий, особенно на их теплоизолирующие свойства, влияет не только фракционный состав наполнителя, но и вид используемого полимерного связующего. Так, в случае использования теплопокрытия в области повышенных температур (до 200 °С) необходимо применять акриловые или стирол-акриловые дисперсии. Толщина покрытия при этом может составлять до 0,8 мм при двухслойном нанесении краски. Для обеспечения хорошей гидроизоляционной защиты поверхности обрабатываемой конструкции или технического оборудования с температурной стойкостью до 100 °С можно использовать битумный лак с примерной толщиной слоя 0,15 мм. При этом толщина покрытия может составлять до пяти слоев в зависимости от требований к теплозащите.

В соответствии с вышеперечисленным было принято решение использовать в качестве полимерного связующего стирол-акриловую дисперсию Latex DL 424. Данная дисперсия хорошо совместима с наполнителями и обладает отличным сопротивлением к воде и щелочным средам, имеет хорошую адгезию к различным поверхностям, быстро сохнет, пожаро- и взрывобезопасна.

Помимо этого, в составе образцов теплоизоляционного лакокрасочного материала для повышения вязкости системы на основе выбранного связующего использовался загуститель Rheovis HS 1212, а для улучшения пленкообразования применялось коалисцирующее вещество Texanol.

Методом математического планирования были подобраны составы образцов теплоизоляционной краски, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Составы образцов теплоизоляционного лакокрасочного материала

№ п/п	Наименование компонентов	Содержание компонентов, % по массе			
		Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 4
1	Полимерное связующее (стирол-акриловый латекс)	60	55	50	45
2	Наполнитель (зольные микросферы)	35	40	45	50
3	Загуститель (Rheovis HS 1212)	3	3	3	2
4	Коалисцент (Texanol)	2	2	2	4

В результате было выявлено, что составы 1, 3 и 4 не дают желаемого результата, т. к. поверхность покрытия получалась с высокой пористостью, что приводило к увеличению водопоглощения у полученных образцов. Оптимальным по качеству и внешнему виду был выбран состав 2, где доля зольных микросфер составила 40 %, полимерного связующего – 55 %, а целевых добавок – 5 %.

Приготовление образцов теплоизоляционного покрытия проводилось по следующей методике: все компоненты дозировались и смешивались в фарфоровой чашке с зольной микросферой вручную без использования высокоскоростных мешалок, чтобы избежать разрушения структуры микросфер. Полученная композиция наносилась на керамическую и металлическую подложку с помощью кисти, после чего покрытия сушили при температуре 20 °С в течение 60 мин. Далее полученные образцы были испытаны на основные физико-механические характеристики в соответствии с действующими нормативными документами. Так как на данный момент нет основного метода определения коэффициента теплопроводности лакокрасочных материалов, этот показатель определялся в соответствии с ГОСТ 7076–99. В табл. 2 приведен сравнительный анализ разработанного состава образца с составом известной теплоизоляционной краски Thermal-Coat.

Из представленных в табл. 2 результатов физико-механических характеристик следует, что образцы покрытия разработанного состава на основе стирол-акриловой дисперсии и смеси зольных микросфер обладают высокой адгезией к керамическим и металлическим основаниям (1,2 и 1,0 МПа соответственно) и высокой степенью коррозионной стойкости (более 5 сут). Образцы лакокрасочного материала рекомендованы как теплоизоляционные, т. к. коэффициент теплопроводности данных изделий равен 0,051 Вт/(м·°С), что сопоставимо с теплопроводностью известных выпускаемых зарубежных и отечественных аналогов теплоизоляционных покрытий. В ходе исследований у получаемых лабораторных образцов покрытия отмечается наличие высокой степени твердости (0,15 усл. ед.) за счет интенсивного процесса полимеризации стирол-акриловой дисперсии в порах зольных микросфер. Использо-

зование в композиции указанного связующего позволяет также повысить эластичность образцов и, как следствие, стойкость к мытью и истиранию.

Таблица 2

**Сравнительные характеристики разработанного состава
с известным аналогом теплоизоляционного лакокрасочного материала**

Наименование показателя	Результаты испытаний		Методика испытаний
	Разработанный состав	Thermal-Coat	
Коэффициент теплопроводности (при 20 °С), Вт/(м·°С)	0,051	0,068	ГОСТ 7076–99
Водопоглощение по массе, %	1,2	1,4	ГОСТ 11529–2016
Термостойкость при температуре 250 °С в течение 1 ч	Покрытие без изменений		ГОСТ 27180–2019
Прочность сцепления с подложкой, МПа: керамической металлической	1,2	0,75	ГОСТ 27037–86
	1,0	1,0	
Определение устойчивости покрытия к воздействию переменных температур (10 циклов попеременного замораживания и оттаивания при температурах –40...+60 °С), циклы	Покрытие без изменений, трещины, вздутия и расслоения отсутствуют		ГОСТ 27037–86
Плотность в жидком состоянии, кг/м ³	770	590	ГОСТ 12730.1–78
Коррозионная стойкость, сут	5	4	ГОСТ 9.509–89
Термостойкость, °С	250	250	ГОСТ 27180–2019
Время высыхания, мин	60	60	ГОСТ 19007–73
Укрывистость, г/м ²	500	500	ГОСТ 8784–75
Твердость покрытия по маятниковому прибору, усл. ед.	0,15	0,095	ГОСТ 5233–89

Таким образом, в ходе проделанной работы была установлена возможность и целесообразность использования зольных полых микросфер в составах теплоизоляционных лакокрасочных материалов в качестве микросферического наполнителя. С целью повышения коррозионной стойкости теплоизоляционных покрытий может быть предусмотрено введение антикоррозионных пигментов в виде сурика железного, оксида цинка и ингибитора коррозии (нитрита натрия).

Областью применения разработанных составов теплоизоляционных красок могут быть поверхности различных форм и материалов, в частности,

для изоляции стен, потолков, крыш зданий и сооружений; котлов, трубопроводов и теплотрасс.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шубин И.Л., Ахмяров Т.А., Беляев В.С., Спиридонов А.В. Энергетическая эффективность ограждающих конструкций: система активного энергосбережения // Строительные материалы. Оборудование. Технологии XXI века. 2014. № 3. С. 43–49.
2. Низина Т.А., Селяев В.П., Инин А.Е. Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности жидкой теплоизоляции с учетом количества слоев и толщины покрытий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 7. С. 6–11.
3. Низина Т.А., Инин А.Е. Энергоэффективные жидкие теплоизоляционные покрытия на основе полых микросфер и тонкодисперсных минеральных наполнителей // Региональная архитектура и строительство. 2015. № 4. С. 33–42.
4. Панченко Ю.Ф., Зимакова Г.А., Панченко Д.А. Энергоэффективность использования нового теплозащитного материала для снижения теплопотребления зданий и сооружений // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 4. С. 97–105.
5. Дружинина Т.Я., Копылова А.А. Актуальность применения жидкой сверхтонкой теплоизоляции в строительстве и эксплуатации промышленных и гражданских объектов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 2. С. 101–104.
6. Гарипов Г.М. Энергосберегающее покрытие на основе акриловых дисперсий и полых стеклянных микросфер // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 6. С. 45–47.
7. Инин А.Е., Низина Т.А., Неверов В.А. Разработка эффективных составов наполненных полимерных связующих для жидких теплоизоляционных покрытий // Разработка эффективных авиационных, промышленных, электротехнических и строительных материалов и исследование их долговечности в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов : материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2013. С. 158–162.
8. 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.
9. Волокитин О.Г., Шеховцов В.В. Перспективы использования низкотемпературной плазмы в строительстве и архитектуре // Физика и химия стекла. 2018. Т. 44. № 3. С. 324–327.
10. 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.
11. Орешкин Д.В., Беляев К.В., Семенов В.С., Кретова У.Е. Полые микросферы – эффективный наполнитель в строительные и тампонажные растворы // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 9. С. 50–51.
12. Теряева Т.Н., Костенко О.В., Исмаилов З.Р., Шикина Н.В., Рудина Н.А., Антипова В.А. Физико-химические свойства алюмосиликатных полых микросфер // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2013. № 5. С. 86–90.
13. Мюллер Б., Пот У. Лакокрасочные материалы и покрытия. Принципы составления рецептур. Москва : ООО «Пейнт-Медиа», 2007. 237 с.
14. Tarun R.N., Rudolph N.K., Rafat S. Controlled Low Strength Materials Containing Mixtures of Coal Ash and New Pozzolan Material // ACI Materials Journal. 2003. V. 100. № 3, May-June. P. 208–215.

REFERENCES

1. Shubin I.L., Akhmyarov T.A., Belyaev V.S., Spiridonov A.V. Energeticheskaya effektivnost' ogradhdayushchikh konstruktсий: sistema aktivnogo energosberezheniya [Energy efficiency of

- wall systems: energy saving]. *Stroitel'nye materialy. Oborudovanie. Tekhnologii XXI veka*. 2014. No. 3. Pp. 43–49. (rus)
2. Nizina T.A., Selyaev V.P., Inin A.E. Eksperimental'noe opredelenie koeffitsienta teploprovodnosti zhidkoi teploizolyatsii s uchetom kolichestva sloev i tolshchiny pokrytii [Experimental determination of thermal conductivity of liquid heat insulation with regard to the number of layers and coating thickness]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2016. No. 7. Pp. 6–11. (rus)
 3. Nizina T.A., Inin A.E. Energoeffektivnye zhidkie teploizolyatsionnye pokrytiya na osnove polykh mikrosfer i tonkodispersnykh mineral'nykh napolnitelei [Energy-efficient liquid heat-insulating coatings based on hollow microspheres and finely dispersed mineral fillers]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*. 2015. No. 4. Pp. 33–42. (rus)
 4. Panchenko Yu.F., Zimakova G.A., Panchenko D.A. Energoeffektivnost' ispol'zovaniya novogo teplozashchitnogo materiala dlya snizheniya teplopotrebleniya zdaniy i sooruzhenii [Energy efficient use of new heat-shielding material to reduce heat consumption of buildings]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2011. No. 4. P. 97–105. (rus)
 5. Druzhinina T.Ya., Kopylova A.A. Aktual'nost' primeneniya zhidkoi sverkhtonkoi teploizolyatsii v stroitel'stve i ekspluatatsii promyshlennykh i grazhdanskikh ob'ektov [Liquid ultra-thin thermal insulation for construction and operation of industrial and civil facilities]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013. No. 2. Pp. 101–104. (rus)
 6. Garipov G.M. Energosberegayushchee pokrytie na osnove akrilovykh dispersii i polykh steklyannykh mikrosfer [Energy-saving coating based on acrylic dispersions and hollow glass microspheres]. *Vestnik kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014. V. 17. No. 6. Pp. 45–47. (rus)
 7. Inin A.E., Nizina T.A., Neverov V.A. Razrabotka effektivnykh sostavov napolnennykh polimernykh svyazuyushchikh dlya zhidkikh teploizolyatsionnykh pokrytii [Development of effective compositions of filled polymer binders for liquid heat-insulating coatings]. In: *Razrabotka effektivnykh aviatsionnykh, promyshlennykh, elektrotekhnicheskikh i stroitel'nykh materialov i issledovanie ikh dolgovechnosti v usloviyakh vozdeistviya razlichnykh ekspluatatsionnykh faktorov: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Proc. Int. Sci. Conf. 'Development of Efficient Aviation, Industrial, Electrical and Construction Materials and Their Durability in Different Operating Conditions')*. Saransk, 2013. Pp. 158–162. (rus)
 8. Volokitin G.G., Shekhovtsov V.V., Skripnikova N.K., Volokitin O.G., Volland S. Fiziko-khimicheskie protsessy polucheniya zol'nykh mikrosfer s ispol'zovaniem nizektemperaturnoi 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)
 9. Volokitin O.G., Shekhovtsov V.V. Perspektivy ispol'zovaniya nizektemperaturnoi plazmy v stroitel'stve i arkhitekture [Prospects for the use of low-temperature plasma in construction and architecture]. *Fizika i khimiya stekla*. 2018. V. 44. No. 3. Pp. 324–327. (rus)
 10. Shekhovtsov V.V., Volokitin O.G., Gafarov R.E., Semenov 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)
 11. Oreshkin D.V., Belyaev K.V., Semenov V.S., Kretova U.E. Polye mikrosfery – effektivnyi napolnitel' v stroitel'nye i tamponazhnye rastvory [Hollow microspheres as effective filler in construction and grouting mortars]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2010. No. 9. Pp. 50–51. (rus)
 12. Teryaeva T.N., Kostenko O.V., Ismagilov Z.R., Shikina N.V., Rudina N.A., Antipova V.A. Fiziko-khimicheskie svoystva alyumosilikatnykh polykh mikrosfer [Physicochemical properties of aluminosilicate hollow microspheres]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013. No. 5. Pp. 86–90. (rus)
 13. Müller B., Poth U. Lakokrasochnye materialy i pokrytiya. Printsipy sostavleniya retseptur [Coatings formulation]. Moscow: Peint-Media, 2007. 237 p. (transl. from Germ.)
 14. Tarun R. N., Rudolph N. K., Rafat S. Controlled low strength materials containing mixtures of coal ash and new pozzolanic material. *ACI Materials Journal*. 2003. V. 100. No. 3. Pp. 208–215.

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

Скрипникова Нелли Карповна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, nks2003@mail.ru

Григорьевская Дарья Константиновна, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, rebeccali@mail.ru

Шеховцов Валентин Валерьевич, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, shehovcov2010@yandex.ru

Authors Details

Viktor A. Vlasov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, rector@tsuab.ru

Nelli K. Skripnikova, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, Solyanaya Sq., 2 Building 2, 634003, Tomsk, Russia, nks2003@mail.ru

Dar'ya K. Grigorevskaya, Graduate Student, Tomsk State University of Architecture and Building, Solyanaya Sq., 2 Building 2, 634003, Tomsk, Russia, rebeccali@mail.ru

Valentin V. Shekhovtsov, PhD, Assistant Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, Solyanaya Sq., 2 Building 2, 634003, Tomsk, Russia, shehovcov2010@yandex.ru

УДК 691.542

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-87-95

*Е.А. СОРОКИНА, Н.О. КОПАНИЦА,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА ДЛЯ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Контроль свойств бетонной смеси и затвердевшего бетона является неотъемлемой частью строительного процесса. Однако с применением в строительстве технологии 3D-печати некоторые методики оценки свойств бетонной смеси и бетона будут иметь свои особенности, связанные с формированием структуры и свойств бетонной смеси и бетона в условиях укладки и набора прочности в тонких слоях. Нормативная документация для достоверной оценки качества бетонной смеси и бетона для 3D-печати в настоящее время отсутствует. Цель исследования заключалась в обосновании и разработке метода определения прочности бетона применительно к технологии 3D-печати. Для проведения исследований по оценке и выбору методики в работе использовалась строительная смесь, ранее разработанная авторами. Состав строительной смеси был подобран исходя из технологических требований оборудования для 3D-печати и обеспечения требуемых характеристик смеси. Для оценки прочности использовались различные способы формования образцов и методы исследования в сравнении с предложенными в ГОСТ 10180–2012. В статье обоснованы основные проблемы контроля качества бетона при использовании аддитивной технологии, предложены методики определения прочностных характеристик с учетом особенностей 3D-печати. Приведена сравнительная оценка их эффективности.

Ключевые слова: 3D-печать; строительная 3D-печать; аддитивные технологии; прочность бетона; методы определения прочности.

Для цитирования: Сорокина Е.А., Копаница Н.О. Анализ и оценка методов определения прочности бетона для аддитивной технологии // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 87–95.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-87-95

*E.A. SOROKINA, N.O. KOPANITSA,**Tomsk State University of Architecture and Building*

ANALYSIS OF CONCRETE STRENGTH DETERMINATION METHODS FOR ADDITIVE MANUFACTURING

The property control of concrete mix and hardened concrete is an integral part of the construction process. With the development of additive manufacturing in construction, the methods of assessing the properties of concrete mix and concrete are characterized by the formation of their structure and properties in concrete laying and curing. Currently, there is no regulatory documentation on a reliable assessment of the concrete mix and concrete quality for additive manufacturing. The purpose of this work is to propose a method for determining the concrete strength for additive manufacturing. The proposed concrete mix composition matches the technological requirements for 3D printing equipment and possesses the required properties. The concrete strength analysis and research methods are carried out in accord with the Russian State Standard. The paper describes the main problems of the concrete quality control in using additive manufacturing and proposes methods for determining the concrete strength properties for 3D printing.

Keywords: 3D printing; additive manufacturing; concrete strength; strength analysis.

For citation: Sorokina E.A., Kopanitsa N.O. Analiz i otsenka metodov opredeleniya prochnosti betona dlya additivnoi tekhnologii [Analysis of concrete strength determination methods for additive manufacturing]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 2. Pp. 87–95.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-87-95

Введение

При производстве строительных работ осуществление контроля качества бетонной смеси и бетона происходит согласно регламентируемым методикам, представленным в нормативных документах. При строительстве методом 3D-печати контроль свойств имеет свои особенности, т. к. не все свойства можно определить традиционными методиками, описанными в национальных стандартах [1].

Регламентируемые нормативными документами методики оценки прочности бетона не дают достоверной информации для условий применения аддитивной технологии ввиду особенностей формирования конструкций. В технологии строительной 3D-печати смесь укладывается тонкими (2–4 см) слоями без опалубки с помощью экструдера, с заданным интервалом времени, на уже набравший начальную прочность слой бетона [2].

Для определения значений прочности тяжелых бетонов на сжатие регламентирована и традиционно применяется методика по государственным стандартам (ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам»), по которой образцы изготавливают в поверенных (калиброванных) формах, соответствующих требованиям ГОСТ 22685. Укладку бетонной смеси в форму и ее уплотнение осуществляют в формах для изготовления образцов в виде куба 100×100×100 мм или 150×150×150 мм. При изготовлении образцов с минимальным размером 70×70×70 мм максимальная крупность заполнителя не должна превышать 20 мм. В случае применения технологии 3D-печати указанный метод не обеспечивает достоверности результатов испытаний, т. к. не учитывает особенности формирования стандартных образцов для испытаний методом послойной укладки с определенным интервалом времени [3–7].

Проблема отсутствия нормативной документации для определения прочностных характеристик для 3D-печати является актуальной, т. к. требования к бетону для 3D-печати имеют свои особенности. Бетон для 3D-печати должен обладать определенными реологическими характеристиками, такими как жесткость, адгезия к нижележащему слою, высокая скорость схватывания, водоудерживающая способность, но при этом обеспечивать заданный проектом класс по прочности бетона.

Цель исследования заключалась в обосновании и разработке метода определения прочности бетона применительно к технологии 3D-печати. Сравнительный анализ особенностей указанных технологий показывает, что основное отличие в методах определения прочности бетона контрольных образцов заключается в принципах их формирования и подготовки для испытаний. Авторами предложены и исследованы следующие способы формирования и подготов-

ки образцов для определения прочности затвердевшей бетонной смеси применительно к аддитивной технологии.

Первый способ – образцы изготавливаются путем экструзии в формы двух последовательно уложенных друг на друга слоев бетонной смеси толщиной 3 см каждый, с интервалом времени, равным 20 мин (технологический интервал укладки слоев).

Второй способ – образцы изготавливаются путем экструзии в один слой бетонной смеси толщиной 3 см, длиной 25 см, из затвердевшей бетонной смеси выпиливаются образцы кубической формы, поверхность шлифуется. Выбор предлагаемых способов основан на известных методах, регламентированных в нормативной документации.

В основе первого способа – методика определения прочности кладочных растворов, взятых из кладки. Данная методика основана на том, что для определения прочности кладочных растворов не требуется точная геометрия образцов. Образцы раствора доводятся до кубической формы путем дополнения растворной смесью с аналогичной прочностью. То же самое можно применить и для экструдированных слоев смеси в аддитивной технологии. В соответствии с [8] испытываемые образцы готовятся из двух пластинок кладочного раствора квадратной формы, склеенных между собой и выровненных по контактными поверхностям гипсовым раствором. По аналогичной технологии были сделаны образцы, изготовленные методом послойной экструзии для проведения исследования.

Второй способ подготовки образцов основан на методе, изложенном в ГОСТ 10180–2012, для определения прочности ячеистых бетонов путем извлечения проб. Образцы из ячеистого бетона выпиливают или выбурируют по ГОСТ 28570 из контрольных неармированных блоков, изготовленных одновременно с изделиями из той же бетонной смеси, или из готовых изделий после их твердения. По аналогичной технологии были изготовлены образцы, полученные методом экструзии, после твердения образцов производился отбор проб-кубов для проведения исследований.

Материалы и способы подготовки образцов

Для проведения исследований по оценке и выбору методики использовалась строительная смесь, ранее разработанная авторами [9, 10]. Состав строительной смеси был подобран исходя из технологических требований оборудования для 3D-печати и обеспечения требуемых характеристик смеси, таких как сохранение формы после экструзии, возможность продавливания через экструдер, отсутствие прилипания к частям экструдера. Образцы готовились с использованием лабораторной установки. Размер образцов 50×50×50 мм обусловлен максимальным диаметром сопла экструдера для печати, который составляет 45 мм. Для определения класса полученного бетона необходимо принять масштабный коэффициент.

Состав применяемой смеси: портландцемент Цем I 42,5Н Топкинского завода, полифракционный песок Кудровского месторождения (размер зерен до 1,25 мм) в соотношении 1:2 с добавлением 10 % микрокремнезема и 0,3 % пластификатора С-3, водотвердое отношение составляло 0,5. Подвижность

смеси, определяемая по расплыву кольца, составляла 75 мм. Смесь сохраняла свои реологические свойства в течение 40 мин.

Форма для укладки экструдруемой строительной смеси имела размеры 50×250 мм с насечками для съемных пластин через каждые 50 мм.

Для изготовления образцов бетонную смесь выдавливали с помощью лабораторного экструдера с соплом диаметром 45 мм в предварительно очищенные и покрытые эмульсионной смазкой формы прямоугольного сечения. Через 20 мин (технологический интервал времени укладки слоев смеси при производстве конструкций) сверху укладывался следующий слой бетонной смеси. После формования слои разделялись перпендикулярно основанию металлическими пластинами на кубики размерами 50×50×50 мм. Размер ячеек обусловлен размером сопла экструдера, тем самым при экструзии смесь укладывалась в два слоя толщиной 3 см. Форма для приготовления образцов изображена на рис. 1.

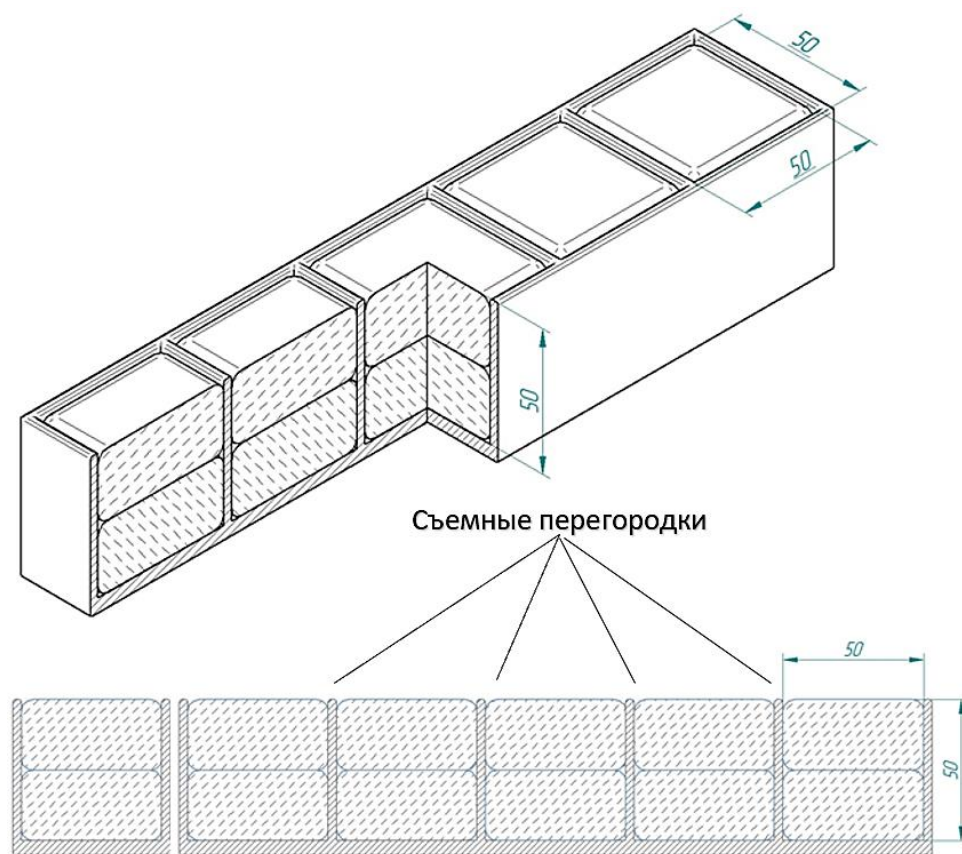


Рис. 1. Схема изготовления образцов 1-м способом

Подготовка образцов вторым способом проводилась в такой последовательности: приготовленную бетонную смесь выдавливали с помощью лабораторного экструдера с соплом диаметром 45 мм в один слой на предва-

рительно очищенную и покрытую эмульсионной смазкой металлическую форму прямоугольного сечения размером 50×250 мм, без съемных перегородок. После изготовления и набора прочности перед испытанием производилась выборка образцов путем выпиливания из экструдированного слоя. Полученные образцы шлифуются перед испытанием с целью придания им формы куба и устранения неровности поверхностей. Схема изготовления образцов показана на рис. 2.

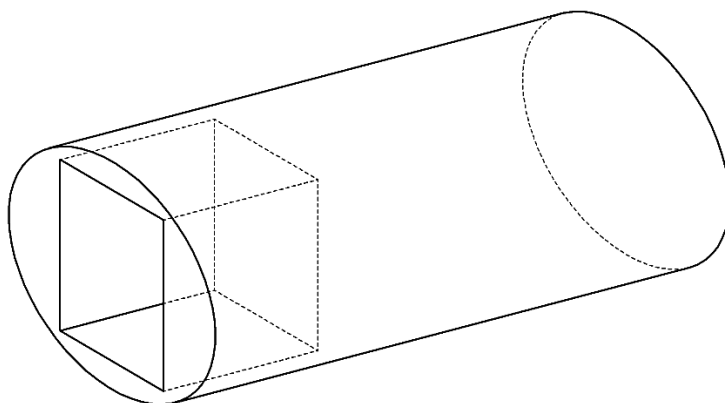


Рис. 2. Образцы, изготовленные 2-м способом

Контрольные образцы изготавливались в соответствии с ГОСТ 10180–2012 в формах – кубах размером 50×50×50 с последующим уплотнением, в дальнейшем испытывались параллельно слоям укладки. Образцы твердели в нормальных условиях при температуре $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ с относительной влажностью окружающего воздуха не менее 90 %. Прочность при сжатии изготовленных образцов определялась в сроки 3, 7 и 28 сут. Измерение прочности в ранние сроки позволяет более точно определить марку и класс бетона. Количество образцов-кубов бетона каждого вида составляло не менее 10 шт.

Результаты исследования

При испытании образцы-кубы устанавливали на одну из боковых граней так, чтобы разрушающее усилие было параллельно слоям укладки. Для сравнения проводилась оценка прочностных характеристик путем приложения усилия перпендикулярно слоям укладки.

Результаты испытаний на прочность при сжатии образцов, подготовленных первым способом, приведены на рис. 3.

Из данных, представленных на диаграмме, видно, что при использовании метода послойного формования прочность на сжатие образцов затвердевшего бетона ниже на 30 % по сравнению с контрольным образцом, изготовленным с уплотнением. При определении прочности методом послойного формования параллельно слоям укладки строительной смеси наблюдается снижение прочности до 10 % по сравнению с образцами, испытанными перпендикулярно слоям укладки, что обусловлено межслойной адгезией. Низкие показатели прочно-

сти объясняются различием методов укладки бетона при изготовлении образцов, неоднородностью бетонных кубов при укладке слоями. Отсюда можно сделать вывод о том, что адгезия между слоями не обеспечивает прочности на сжатие, сравнимой с прочностью контрольного образца. Слои затвердевшего бетона, воспринимая нагрузку, работают самостоятельно, поэтому прочностные характеристики следует определять как для конструкции, учитывая упруго-деформационное состояние каждого элемента слоя.

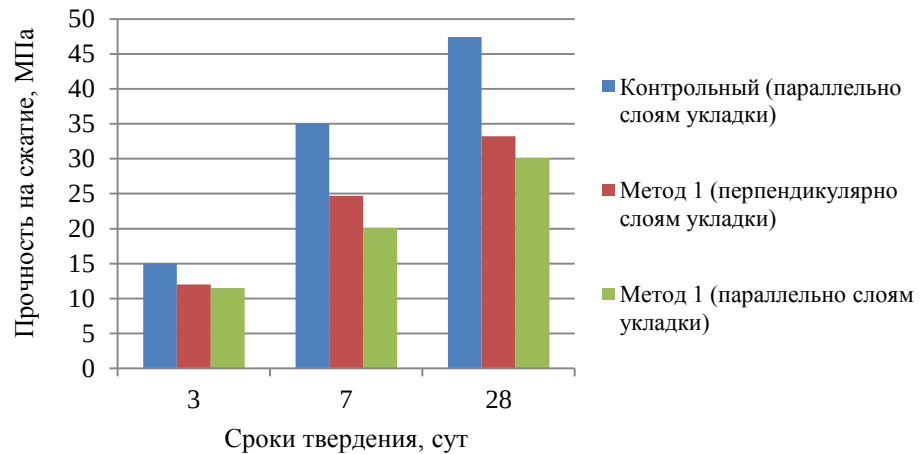


Рис. 3. Прочность на сжатие образцов, изготовленных 1-м методом

Результаты по определению прочности на сжатие образцов, подготовленных по 2-му способу, в возрасте 3, 7, 28 сут представлены на рис. 4.

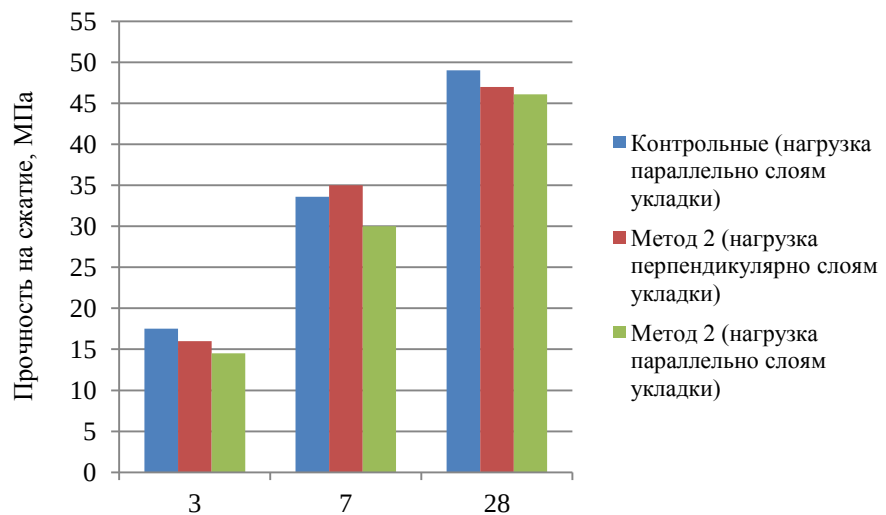


Рис. 4. Прочность на сжатие образцов, изготовленных 2-м методом

Анализ данных, представленных на рис. 4, показал, что при нагрузке параллельно слоям укладки смеси образцов на 28-е сут прочность составляет

47 МПа (что меньше контрольных образцов на 6 %). При нагрузке перпендикулярно слоям укладки образцов на 7-е сут прочность на сжатие увеличилась на 4 % в сравнении с контрольными образцами, что можно отнести к погрешности метода. Таким образом, можно сделать вывод о том, что 2-й метод близок к методу, изложенному в ГОСТ 10180–2012. Способ приложения нагрузки обусловлен тем, что поверхности образцов при приложении нагрузки перпендикулярно слоям укладки имеют заглаженную поверхность, что обеспечивает стабильные показатели прочности. По аналогии приложение нагрузки перпендикулярно слоям укладки применяется для кернов цементобетона. В Рекомендациях по контролю прочности цементобетона покрытий и оснований автомобильных дорог по образцам описан способ определения прочности при сжатии. Керны из покрытия или основания выбуривают со стороны верхней, заглаженной поверхности. Соответственно их испытывают на прочность на сжатие так, что сила прикладывается перпендикулярно слоям укладки бетонной смеси, а не параллельно, как при испытании кубов по базовой схеме испытания. Предложенный метод может быть рекомендован для применения при контроле прочности бетона для 3D-печати.

На основе полученных результатов определялся коэффициент вариации показателей прочности образцов (таблица), изготовленных различными методами. Количество образцов составляло не менее 10 шт. каждого вида. Коэффициенты вариации получены высокие ввиду того, что испытания проводились на образцах с малыми размерами 50×50×50 мм, обусловлены погрешностью метода.

**Коэффициенты вариации показателей прочности образцов,
изготовленных различными методами**

№ п/п	Способ изготовления образцов	Коэффициент вариации, %
1	Цементно-песчаные кубы, приготовленные в соответствии с ГОСТ 10180–2012	2,9–3,5
2	Образцы, изготовленные 1-м способом (нагрузка перпендикулярно слоям укладки)	10,9–11,5
3	Образцы, изготовленные 1-м способом (нагрузка параллельно слоям укладки)	12,0–12,9
4	Образцы, изготовленные 2-м способом (нагрузка перпендикулярно слоям укладки)	6,2–7,7
5	Образцы, изготовленные 2-м способом (нагрузка параллельно слоям укладки)	10,1–11,9

Из полученных данных видно, что меньший показатель коэффициента вариации в сравнении с контрольными показали образцы бетона, подготовленные вторым способом (6,2–7,7 %). Полученные результаты показывают, что данный метод наиболее приближен к методике, описанной в ГОСТ 10180–2012, и может быть адаптирован для определения прочности экструдированных образцов.

Заключение

Получены сравнительные результаты по оценке прочности при сжатии бетона двумя методами. Данные результаты показали, что метод определения прочности бетонных образцов, изготовленных по 2-му способу, можно использовать для определения прочности бетона применительно к аддитивным технологиям формирования строительных конструкций, т. к. он наиболее приближен к методике, описанной в ГОСТ 10180–2012. Это подтверждено значениями коэффициента вариации и показателями прочности бетонных образцов при сжатии, близкими к контрольным, и может быть применено в дополнение к методике, изложенной в ГОСТ 10180–2012.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сорокина Е.А. Технологические аспекты формирования составов бетонных смесей для 3D-печати // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2017. С. 134–136.
2. Копаница Н.О., Гулёнин В.В., Сорокина Е.А. Особенности контроля качества бетона для строительной 3D-печати // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 7 т. Т. 6. Строительство и архитектура / под ред. И.А. Курзиной, Г.А. Вороновой. Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. С. 43–45.
3. Сорокина Е.А., Гулёнин В.В. Проблемы контроля качества смесей для строительной 3D-печати // Повышение качества и эффективности строительных и специальных материалов : сборник Национальной научно-технической конференции с международным участием. 2019. С. 43–46.
4. Qiang Yuana, Zemin Lia, Dajun Zhouab, Tingjie Huangac, Hai Huangac, Dengwu Jiaod, Caijun Shid. A feasible method for measuring the buildability of fresh 3D printing mortar // Construction and Building Materials. 2019. 116600.
5. Демьяненко О.В., Копаница Н.О., Сорокина Е.А., Ничинский А.Н. Физико-технические свойства фибробетонов с использованием вторичного минераловатного сырья // Строительные материалы. 2019. № 7. С. 16–20.
6. Демьяненко О.В., Копаница Н.О., Сорокина Е.А. Влияние добавки термомодифицированного торфа на технологические свойства строительных смесей для 3D-печати // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 4. С. 122–134.
7. Bing Luab, Yiwei Wengab, Mingyang Lia, Ye Qiana, Kah Fai Leonga, Ming Jen Tana, Shunzhi Qianab. A systematical review of 3D printable cementitious materials // Construction and Building Materials. 2019. P. 477–490.
8. Рекомендации по обследованию и оценке технического состояния крупнопанельных и каменных зданий. Москва : ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1988. 57 с.
9. Gorlenko N.P., Sarkisov Y.S., Demyanenko O.V., Kopanitsa N.O., Sorokina E.A., Nichinskiy A.N., Gorynin G.L. Fine-grained concrete fibre-reinforced by secondary mineral wool raw material // Journal of Physics: Conference Series. 2018. P. 012059.
10. Demyanenko O., Sorokina E., Kopanitsa N., Sarkisov Y. Mortars for 3d printing // MATEC Web of Conferences. 2018. P. 02013.

REFERENCES

1. Sorokina E.A. Tekhnologicheskie aspekty formirovaniya sostavov betonnykh smesei dlya 3d-pechati [Technological aspects of concrete mix formation for 3D printing]. In: Perspektivy

- razvitiya fundamental'nykh nauk. sbornik nauchnykh trudov XIV Mezhdunarodnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (Proc. 14th Int. Sci. Conf. of Students and Young Scientists 'Prospects of Fundamental Sciences Development'). Tomsk: TPU. 2017. Pp. 134–136. (rus)
2. Kopanitsa N.O., Gulenin V.V., Sorokina E.A. Osobennosti kontrolya kachestva betona dlya stroitel'noi 3d-pechati [Concrete quality control for 3D printing in construction]. In: Perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk. Sbornik nauchnykh trudov XVI Mezhdunarodnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (Proc. 16th Int. Sci. Conf. of Students and Young Scientists 'Prospects of Fundamental Sciences Development'), in 7 vol. 2019. Pp. 43–45. (rus)
 3. Sorokina E.A., Gulenin V.V. Problemy kontrolya kachestva smesei dlya stroitel'noi 3d-pechati [Concrete quality control for 3D printing in construction]. In: Povyshenie kachestva i effektivnosti stroitel'nykh i spetsial'nykh materialov. Sbornik Natsional'noi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (Proc. Int. Sci. Conf. 'Quality and Efficiency Improvement of Construction and Qualified Materials'). 2019. Pp. 43–46. (rus)
 4. Qiang Yuana, Zemin Lia, Dajun Zhouab, Tingjie Huangc, Hai Huangac, Dengwu Jiaod, Caijun Shid. A feasible method for measuring the buildability of fresh 3D printing mortar. *Construction and Building Materials*. 2019. 116600.
 5. Dem'yanenko O.V., Kopanitsa N.O., Sorokina E.A., Nichinskii A.N. Fiziko-tekhnicheskie svoystva fibrobetonov s ispol'zovaniem vtorichnogo mineralovatnogo syr'ya [Physical properties of fiber concrete with recycled mineral wool raw materials]. *Stroitel'nye materialy*. 2019. No. 7. Pp. 16–20. (rus)
 6. 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 of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2018. V. 20. No. 4. Pp. 122–134. (rus)
 7. Bing Luab, Yiwei Wengab, Mingyang Lia, Ye Qiana, Kah Fai Leonga, Ming Jen Tana, Shunzhi Qianab. A systematical review of 3D printable cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2019. Pp. 477–490.
 8. Rekomendatsii po obsledovaniyu i otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya krupnopanel'nykh i kamennykh zdaniy [Recommendations for inspection and assessment of technical condition of large-panel and stone buildings]. Moscow, 1988. 57 p. (rus)
 9. Gorlenko N.P., Sarkisov Y.S., Demyanenko O.V., Kopanitsa N.O., Sorokina E.A., Nichinskiy A.N., Gorynin G.L. Fine-grained concrete fibre-reinforced by secondary mineral wool raw material. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. 012059.
 10. Demyanenko O., Sorokina E., Kopanitsa N., Sarkisov Y. Mortars for 3D printing. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 02013. (rus)

Сведения об авторах

Сорокина Екатерина Александровна, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, rtak.5@mail.ru

Копаница Наталья Олеговна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kopanitsa@mail.ru

Authors Details

Ekatерina A. Sorokina, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, rtak.5@mail.ru

Natal'ya O. Kopanitsa, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kopanitsa@mail.ru

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 699.86

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-96-104

*А.Н. БЕЛОУС, О.Е. БЕЛОУС, С.В. КРАХИН,
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры*

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В ТОЛЩЕ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ СУТОЧНОМ ЦИКЛЕ ЛЕТНЕГО ПЕРИОДА

Нормируемым показателем является сопротивление теплопередаче как основной фактор, играющий главную роль в оценке энергоэффективности тепловой оболочки здания. В условиях изменений климата последних десятилетий в направлении повышения средней суточной температуры в летний период все актуальнее становится задача теплоустойчивости наружных ограждающих конструкций. Решение данной задачи сводилось к предположению, что тепловой поток в ограждающей конструкции направлен от наружной поверхности к внутренней. В статье рассматривается распределение теплового потока во времени в толще ограждения и приводится анализ его перераспределения. Также представлен сравнительный анализ данных, полученных путем моделирования нестационарного теплового потока и вычисленных значений классическим методом решения задачи теплоустойчивости.

Ключевые слова: температура; перераспределение; ограждающие конструкции; нестационарный режим; тепловой поток.

Для цитирования: Белоус А.Н., Белоус О.Е., Крахин С.В. Перераспределение теплового потока в толще ограждающей конструкции при суточном цикле летнего периода // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 96–104.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-96-104

*A.N. BELOUS, O.E. BELOUS, S.V. KRAKHIN,
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*

HEAT FLOW REDISTRIBUTION IN WALL STRUCTURE DURING DIURNAL CYCLE IN SUMMER

The standardized indicator is the heat transfer resistance as the main factor that plays the main role in assessing the energy efficiency of the thermal envelope of a building. During the last decades, the climatic conditions change toward the increase in average daily temperature in the summer period. Thus, the thermal resistance of external wall structures becomes more

and more urgent. This problem is reduced to an assumption that the heat flow in the wall structure is directed from the external surface to the internal. This paper analyzes the heat flow distribution and redistribution in time in the wall structure. The paper presents a comparative analysis of the modelling and calculation results of the nonstationary heat flow for solving the thermal stability problem.

Keywords: temperature; redistribution; wall structure; nonstationary heat flow.

For citation: Belous A.N., Belous O.E., Krakhin S.V. Pereraspredelenie teplovogo potoka v tolshche ograzhdayushchei konstruktсии pri sutochnom tsikle letnego perioda [Heat flow redistribution in wall structure during diurnal cycle in summer]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 2. Pp. 96–104. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-96-104

Введение

Учитывая тот факт, что наружные ограждающие конструкции представляют собой многослойные системы, которые имеют большое количество различных теплопроводных включений, при их проектировании и расчете особое внимание необходимо уделить приведённому сопротивлению теплопередаче [1–7]. Для теоретического определения приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций были разработаны различные методики [8–12]. Данные требования к проектированию ограждающих конструкций в первую очередь были созданы для экономии энергетических ресурсов, что является одной из самых актуальных проблем, т. к. это связано с постоянным ростом стоимости на электроэнергию и прочие энергоносители. Но необходимо помнить о том, что жилые здания также должны соответствовать условиям комфортности. При оценке (наружных ограждающих конструкций) эксплуатации жилых и общественных зданий в летний период года необходимо учитывать все особенности летнего теплового режима, для которого характерна периодичность, связанная с суточным колебанием параметров наружного воздуха и интенсивностью солнечной радиации. Профессор В.Н. Богословский [13] предложил ограничить амплитуду колебания температуры на внутренней поверхности наружных ограждающих конструкций в летний период года, что соответствует 2-му условию комфортности.

В 60-х гг. XX в. А.М. Шкловер в своих трудах решил многие задачи, связанные с теплоустойчивостью наружных ограждающих конструкций и помещений. Была определена зависимость теплоустойчивости наружных ограждений от их конструктивного решения [14]. Но в данных работах представлены в основном только многослойные ограждающие конструкции без рассмотрения внутренних процессов аккумулялирования и перераспределения теплового потока.

Развитие методик расчета теплоустойчивости ограждающих конструкций в своих трудах предложили российские ученые [15–18]. Отдельные вопросы нестационарного режима ограждающих конструкций решали в своих трудах и иностранные ученые [19–21]. Основной особенностью всех этих работ является рассмотрение теплового потока как вектора, направленного от наружной поверхности к внутренней, без учета возможности нагрева предыдущего слоя или его части, что не соответствует второму закону термодинамики.

Целью настоящего исследования является выявление перераспределения тепловых потоков в толще ограждающих конструкций при нестационарном тепловом режиме.

Методы

Для построения температурного поля во времени в толще ограждающей конструкции необходимо решить уравнение Фурье при нестационарном режиме теплового потока. Решение сводится к описанию граничных условий и нахождению частных производных. Одним из возможных путей решения является моделирование данной задачи в программном комплексе. Из возможных доступных программ выступает ELCUT 6.4, которая позволяет решать подобные задачи методом конечных элементов. Моделирование сводится к построению геометрической схемы, разбивке модели на сетку конечных элементов, описанию физических параметров материалов (плотность, теплопроводность, теплоемкость), назначению граничных условий и источников тепла с учетом изменений во времени. Большинство операций по вводу данных происходят в оконных режимах программы и являются справочными величинами.

Совместное воздействие температуры наружного воздуха и солнечной радиации на наружную поверхность ограждающей конструкции можно выразить через эффективную температуру воздуха у наружной поверхности ограждения $T_{\text{усл}}$, К, которую можно рассчитывать по формуле

$$T_{\text{усл}} = T_{\text{н}} \sqrt[4]{\frac{G(\alpha)}{G_{\text{ср}}(\alpha)}} + r \frac{I(\alpha, \beta) + i(\alpha, \beta)}{\alpha_{\text{н}}}, \quad (1)$$

где α и β – угловая высота и азимут нормали к поверхности в данной точке; $T_{\text{н}}$ – температура наружного воздуха, К; G , I , i – энергетическая освещенность поверхности в данной точке соответственно тепловой, прямой солнечной и рассеянной солнечной радиацией, Вт/м²; $G_{\text{ср}}$ – пространственная интенсивность тепловой радиации, Вт/м²; r – альбедо поверхности в долях единицы; $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплообмена между наружной поверхностью ограждения и наружным воздухом, Вт/(м²·К).

Распределение температуры у наружной поверхности в модели необходимо задавать по закону косинуса с максимумом и минимумом значений в 3 часа дня и 3 часа ночи по солнечному времени, вычисленных согласно формуле (1).

Результаты исследования

В программном комплексе ELCUT 6.4 произведено моделирование нестационарного температурного режима для трех схем. Первая и вторая схемы – однородная однослойная ограждающая конструкция из пенобетона плотностью 800 кг/м³ и тяжелого железобетона толщиной 300 мм. Третья схема представляет собой трехслойную ограждающую конструкцию с наружными слоями из железобетона толщиной по 80 мм и внутренним слоем из базальтовой ваты плотностью 80 кг/м³ и толщиной 140 мм.

В результате анализа изменения температурного поля однородной зоны во времени обнаружен эффект аккумуляирования тепла внутренними слоями.

Рассмотрим детально распределение температурного потока во времени (рис. 1) для ограждающей конструкции из пенобетона. Для этого разобьем цикл колебания температур внутри ограждающей конструкции в зависимости от воздействия наружного воздуха и солнечной радиации на шесть этапов. Отсчет первого этапа начинается с достижения максимальной температуры в ограждающей конструкции (рис. 1, *а*). Второй этап начинается с начала охлаждения наружной поверхности, при этом фиксируется продолжение проникания и сохранения максимальной температуры в толще конструкции (рис. 1, *б*).

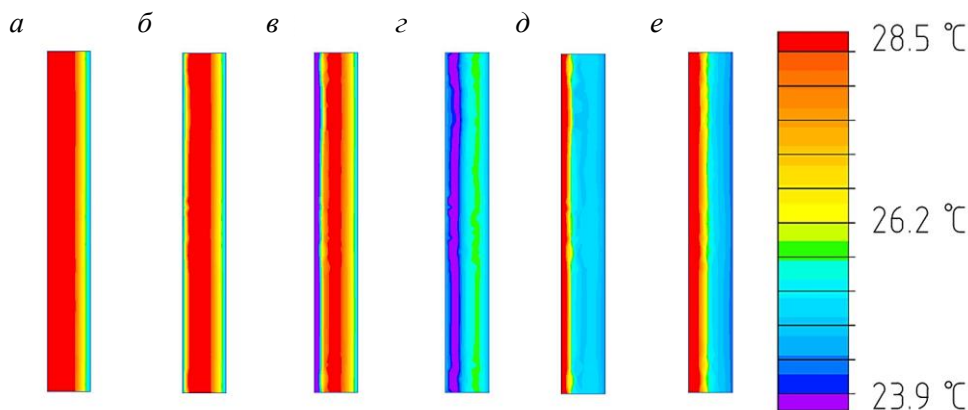


Рис. 1. Распределение температурного поля в толще ограждающей конструкции из пенобетона в периоды:

а – начальной фазы прогрева; *б* – максимальных температур; *в* – начала остывания; *г* – минимальной температуры; *д* – полупрогрева; *е* – конечной фазы остывания

На третьем этапе происходит одновременное продолжение охлаждения наружной поверхности и уменьшение зоны максимальных температур за счет отдачи тепла в более холодную зону (рис. 1, *в*), при этом фиксируется распространение тепла как в направлении внутрь помещения, так и к наружной зоне стены. Четвертый этап характеризуется распространением минимальной температуры вглубь конструкции (рис. 1, *г*), однако зона с повышенной температурой в толще стены противостоит проникновению низких температур и частично продолжает подогревать внутреннюю зону стены. На пятом этапе начинается прогрев наружной поверхности (рис. 1, *д*). Однако около наружной поверхности образуется зона с низкими температурами, которая в дальнейшем при прогревании конструкции схожа по своему поведению с зоной максимальных температур из третьего этапа с отличием в температурах: третий этап не «пропускал» низкие температуры, а шестой – «повышенные» температуры.

При моделировании ограждающей конструкции из тяжелого железобетона была получена аналогичная картина распределения температурных полей в шести этапах. Основное отличие первых двух расчетных моделей заключается в максимальных и минимальных зафиксированных температурах (рис. 2), а также скорости смены этапов.

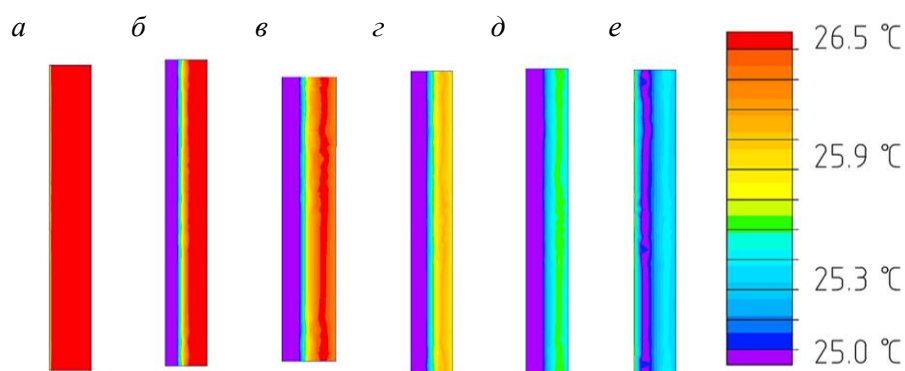


Рис. 2. Распределение температурного поля в толще ограждающей конструкции из пенобетона в периоды:

а – начальной фазы прогрева; б – максимальных температур; в – начала остывания; г – минимальной температуры; д – полупрогрева; е – конечной фазы остывания

В случае температурного колебания у наружной поверхности многослойной конструкции наблюдается картина распределения температурного поля, отличная от предыдущих двух вариантов (рис. 3). Если для однослойной конструкции характерна картина из шести этапов, то для многослойной конструкции – пяти. Также отмечено, что изменение температур происходит в двух наружных слоях по схеме «аккумулятор-изолятор». В наружном слое, выполненном из железобетона, происходит достижение максимальных и минимальных температур, которые частично передаются слою утеплителя (изолятора). При понижении температуры в окружающей среде происходит снижение температуры в наружном слое, и тепловой поток перераспределяется между двумя направлениями: продвижение к внутренней и к наружной грани. Таким образом, в наружном слое постоянно поддерживаются более высокие температуры по сравнению с внутренним слоем.

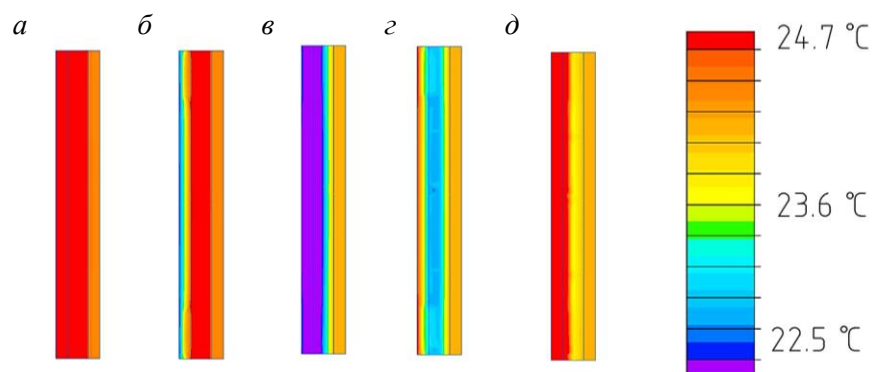


Рис. 3. Распределение температурного поля в толще трехслойной ограждающей конструкции в период:

а – начальной фазы прогрева; б – максимальных температур; в – начала остывания; г – минимальной температуры; д – полупрогрева

Для данных схем установлены следующие значения амплитуд колебания температуры на внутренней поверхности ограждающей конструкции (рис. 4): 0,32 °С – для многослойной; 2,94 °С – железобетонной и 0,96 °С – пенобетонной.

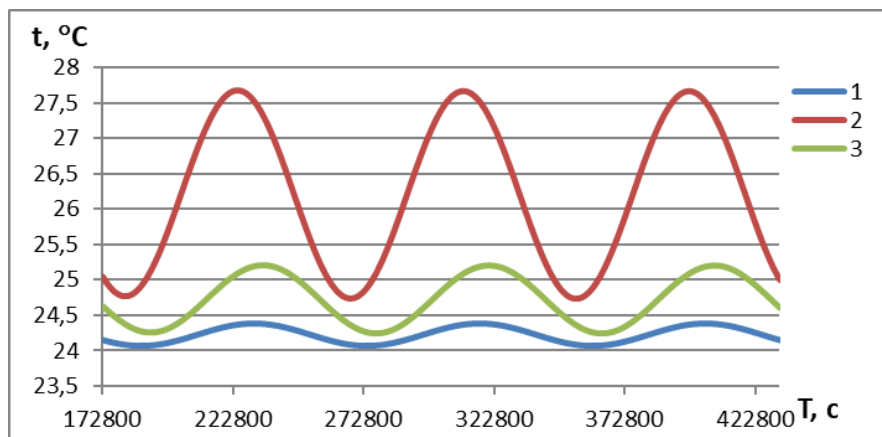


Рис. 4. Температурные колебания на внутренней поверхности конструкций:
1 – многослойной; 2 – железобетонной; 3 – пенобетонной

Согласно общепринятой методике расчета амплитуды колебания на внутренней поверхности [13], через коэффициент затухания амплитуды колебания температуры γ вычисленные значения амплитуды для многослойной конструкции равны 0,40 °С; железобетонной – 3,15 °С; пенобетонной ограждающей конструкции – 0,67 °С. Данное расхождение подтверждает необходимость учета перераспределения теплового потока внутри ограждающей однородной однослойной или многослойной конструкции.

Заключение

Согласно исследованиям распределения теплового поля в ограждающей конструкции, при нестационарных условиях теплопередачи, установлено движение теплового потока в начальных фазах по направлению к внутренней грани и движение теплового потока к наружной грани от прогретой внутренней зоны для однослойных конструкций. Для рассматриваемой многослойной конструкции установлен более сложный теплообмен внутри конструкции, не затрагивающий внутренний слой.

Исходя из анализа полученных данных, путем моделирования нестационарных условий теплопередачи и численным общепринятым методом, установлена расхожимость значений амплитуды колебания на внутренней поверхности до 30 %, что частично объясняется аккумулярованием тепла внутри конструкции и перераспределением вектора теплового потока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самарин О.Д., Шевченко И.С. Оценка теплотехнической неоднородности наружной стены при изменении толщины утеплителя // Журнал С.О.К. 2016. № 3. С. 42–43.

2. Самарин О.Д., Макешин Д.А. Обоснование теплозащиты неоднородных ограждений // Журнал С.О.К. 2015. № 4. С. 52–54.
3. Голубев С.С. Определение приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций на основе численного расчета распределения температурных полей // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. № 5. С. 93–97.
4. Макаров Р.А., Муреев П.Н., Макаров А.Н. Определение поправки к термическому сопротивлению при квазистационарном режиме теплопередачи в наружных стенах, выложенных из кирпича // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. С. 1992–1992.
5. Макаров А.Н., Муреев П.Н., Макаров Р.А. Решение задачи регулирования температуры внутренней поверхности наружных стен реконструируемых зданий постройки 60–80-х годов XX века // Фундаментальные исследования. 2016. № 6-1. С. 83–87.
6. Миков А.В., Балушкин А.Л. Влияние теплопроводных включений на расчет приведенного сопротивления теплопередаче фасада жилого здания с использованием расчетов температурных полей // Научно-технический прогресс как механизм развития современного общества: сборник статей Международной научно-практической конференции. Уфа, 2020. С. 38–45.
7. Белоус А.Н., Котов Г.А., Сапронов Д.А., Новиков Б.А. Определение сопротивления теплопередаче при нестационарном тепловом режиме // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. 22(6). С. 83–93.
8. Гагарин В.Г., Неклюдов А.Ю. Учет теплотехнических неоднородностей ограждений при определении тепловой нагрузки на систему отопления здания // Жилищное строительство. 2014. № 6. С. 3–7.
9. Гагарин В.Г., Плющенко Н.Ю. Определение термического сопротивления вентилируемой прослойки НФС // Строительство: наука и образование. 2015. № 1. С. 1–1.
10. Горшков А.С. Предложения по совершенствованию нормативных требований к ограждающим конструкциям // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2017. № 1–2. С. 49–52.
11. Михеев Д.А. Сравнительный анализ отмененного и предложенного методов расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций // Научный журнал строительства и архитектуры. 2017. № 3 (47). С. 11–20.
12. Туснина О.А. Теплотехнический расчет конструкций численными методами // Вестник МГСУ. 2013. № 11. С. 91–99.
13. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). Москва : Высшая школа, 1982. 415 с.
14. Кошлатый О.Б. Зависимость теплоустойчивости наружных стен от их конструктивного решения // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. 2013. Т. 2. С. 357–360.
15. Малявина Е.Г., Усманов Ш.З. Ограничение амплитуды колебаний температуры помещения в теплый период года // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 188–194.
16. Горшков А.С., Рымкевич П.П. Диаграммный метод описания процесса нестационарной теплопередачи // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 8 (60). С. 68–82.
17. Панферов В.И., Панферов С.Ф. Применение метода частотных передаточных функций для решения одной задачи теплоустойчивости ограждения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Т. 15. № 1. С. 48–51.
18. Кутуев М.Д., Манапбаев И.К. Использование метода интерполирования для расчета теплоустойчивости ограждающих конструкций в условиях Кыргызстана // Вестник КРСУ. 2017. Т. 17. № 5. С. 157–159.
19. Deconinck A., Roels S. The as-built thermal quality of building components: characterising non-stationary phenomena through inverse modelling // Energy Procedia. 2017, October V. 132. P. 351–356.
20. Rulik S., Wróblewski W., Majkut M., Strozik M., Rusin K. Experimental and numerical analysis of heat transfer within cavity working under highly non-stationary flow conditions // Energy January. 2020. V. 190:116303.

21. *Stolarska A., Strzalkowski J.* Modelling of Edge Insulation Depending on Boundary Conditions for the Ground Level // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2017, October. V. 245 (4):042003.

REFERENCES

1. *Samarin O.D., Shevchenkova I.S.* Otsenka teplotekhnicheskoi neodnorodnosti naruzhnoi steny pri izmenenii tolshchiny uteplitelya [Assessment of thermal heterogeneity of outer wall in changing the insulation thickness]. *Zhurnal S.O.K.* 2016. No. 3. Pp. 42–43. (rus)
2. *Samarin O.D., Makeshin D.A.* Obosnovanie teplozashchity neodnorodnykh ograzhdenii [Thermal protection of heterogeneous envelopes]. *Zhurnal S.O.K.* 2015. No. 4. Pp. 52–54. (rus)
3. *Golubev. S.S.* Opredelenie privedennogo soprotivleniya teploperedache ograzhdayushchikh konstruktssii na osnove chislennogo rascheta raspredeleniya temperaturnykh polei [Numerical calculation of temperature field distribution for heat transfer resistance of building envelopes]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya.* 2011. No. 5. Pp. 93–97. (rus)
4. *Makarov R.A., Mureev P.N., Makarov A.N.* Opredelenie popravki k termicheskomu soprotivleniyu pri kvazistatsionarnom rezhime teploperedachi v naruzhnykh stenakh, vypolnennykh iz kirpicha [Thermal resistance correction for quasi-stationary heat transfer in external brick walls]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya.* 2015. No. 1–1. P. 1992. (rus)
5. *Makarov A.N., Mureev P.N., Makarov R.A.* Reshenie zadachi regulirovaniya temperatury vnutrennei poverkhnosti naruzhnykh sten rekonstruirovannykh zdaniy postroiki 60–80-kh godov XX veka [Regulation of internal temperature of exterior walls of renovated buildings built in the 1960s and 1980s]. *Fundamental'nye issledovaniya.* 2016. No. 6-1. Pp. 83–87. (rus)
6. *Mikov A.V., Balushkin A.L.* Vliyanie teploprovodnykh vklyuchenii na raschet privedennogo soprotivleniya teploperedache fasada zhilogo zdaniya s ispol'zovaniem raschetov temperaturnykh polei [Influence of thermal inclusions on temperature field calculations of residential building façade]. In: *Nauchno-tekhnicheskii progress kak mekhanizm razvitiya sovremennogo obshchestva: sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Proc. Int. Sci. Conf. 'Scientific and Technological Progress as a Mechanism for Development of Modern Society')*. Ufa, 2020. Pp. 38–45. (rus)
7. *Belous A.N., Kotov G.A., Sapronov D.A., Novikov B.A.* Opredelenie soprotivleniya teploperedache pri nestatsionarnom teplovom rezhime [Heat transfer resistance in non-stationary thermal conditions]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture.* 2020. V. 22. No. 6. Pp. 83–93. (rus)
8. *Gagarin V.G., Neklyudov A.Yu.* Uchet teplotekhnicheskikh neodnorodnostei ograzhdenii pri opredelenii teplovoi nagruzki na sistemu otopeniya zdaniya [Thermal inhomogeneities of building envelope in determining heat load on the building heating system]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo.* 2014. No. 6. Pp. 3–7. (rus)
9. *Gagarin V.G., Plyushchenko N.Yu.* Opredelenie termicheskogo soprotivleniya ventiliruemoi prosloiki NFS [Thermal resistance analysis of ventilated cavity]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie.* 2015. No. 1. P. 1. (rus)
10. *Gorshkov A.S.* Predlozheniya po sovershenstvovaniyu normativnykh trebovaniy k ograzhdayushchim konstruktssiyam [Improvement of regulatory requirements for building envelopes]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka.* 2017. No. 1–2. Pp. 49–52. (rus)
11. *Mikheev D.A.* Sravnitel'nyi analiz otmenennogo i predlozhennogo metodov rascheta privedennogo soprotivleniya teploperedache ograzhdayushchikh konstruktssii [Comparative analysis of abolished and proposed methods for calculating heat transfer resistance of building envelopes]. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury.* 2017. No. 3 (47). Pp. 11–20. (rus)
12. *Tusnina O.A.* Teplotekhnicheskii raschet konstruktssii chislennymi metodami [Thermal analysis of structures using numerical methods]. *Vestnik MGSU.* 2013. No. 11. Pp. 91–99. (rus)
13. *Bogoslovskii V.N.* Stroitel'naya teplofizika (teplofizicheskie osnovy otopeniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukh) [Building thermophysics (thermal physics of heating, ventilation and air conditioning)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1982. 415 p. (rus)
14. *Koshlatyi O.B.* Zavisimost' teploustoichivosti naruzhnykh sten ot ikh konstruktivnogo resheniya [Dependence of thermal resistance of exterior walls on their design]. In: *Novye idei novogo*

- veka: materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (*Proc. Int. Sci. Conf. 'New Ideas of New Century'*). 2013. V. 2. Pp. 357–360. (rus)
15. Malyavina E.G., Usmanov Sh.Z. Ogranichenie amplitudy kolebaniy temperatury pomeshcheniya v teplyi period goda [Limiting the amplitude of room temperature fluctuations during summer period]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2017. No. 2 (61). Pp. 188–194. (rus)
 16. Gorshkov A.S., Rymkevich P.P. Diagrammnyi metod opisaniya protsessa nestatsionarnoi teploperedachi [Diagrammatic method for describing an unsteady heat transfer process]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2015. No. 8 (60). Pp. 68–82. (rus)
 17. Panferov V.I., Panferov S.F. Primenenie metoda chastotnykh peredatochnykh funktsii dlya resheniya odnoi zadachi teploustoichivosti ograzhdeniya [Method of frequency transfer functions to solve a single heat resistance problem of building envelope]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2015. V. 15. No. 1. Pp. 48–51. (rus)
 18. Kutuev M.D., Manapbaev I.K. Ispol'zovanie metoda interpolirovaniya dlya rascheta teploustoichivosti ograzhdayushchikh konstruktov v usloviyakh Kyrgystana [Interpolation method for thermal resistance analysis of building envelopes in Kyrgyzstan]. *Vestnik KRSU*. 2017. V. 17. No. 5. Pp. 157–159. (rus)
 19. Deconinck A., Roels S. The as-built thermal quality of building components: characterising non-stationary phenomena through inverse modelling. *Energy Procedia*. 2017. V. 132. Pp. 351–356.
 20. Rulik S., Wróblewski W., Majkut M., Stozik M., Rusin K. Experimental and numerical analysis of heat transfer within cavity working under highly non-stationary flow conditions. *Energy*. 2020. V. 190. 116303.
 21. Stolarska A., Strzalkowski J. Modelling of edge insulation depending on boundary conditions for the ground level. *IOP Conference: Series Materials Science and Engineering*. 2017. V. 245 No. 4. 042003.

Сведения об авторах

Белоус Алексей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 286123, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, 2, a.n.belous@donnasa.ru

Белоус Ольга Евгениевна, ассистент, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 286123, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, 2, o.e.belous@donnasa.ru

Крахин Станислав Валерьевич, ст. преподаватель, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 286123, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, 2, stakr@yandex.ua

Authors Details

Aleksei N. Belous, PhD, A/Professor, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin Str., Donetsk Region, 86123, Makiivka, Donetsk People's Republic, a.n.belous@donnasa.ru

Ol'ga E. Belous, Assistant Lecturer, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin Str., Donetsk Region, 86123, Makiivka, Donetsk People's Republic, o.e.belous@donnasa.ru

Stanislav V. Krakhin, Senior Lecturer, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin Str., Donetsk Region, 86123, Makiivka, Donetsk People's Republic, stakr@yandex.ua

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 628.31:66.081

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-105-117

А.А. ВОРОНОВ¹, С.В. МАКСИМОВА¹, Е.Ю. ОСИПОВА²,

¹Тюменский индустриальный университет,

²Томский государственный архитектурно-строительный университет

ОЧИСТКА ТАЛЫХ ВОД УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИТОСОРБЕНТОВ

Рассматривается проблема очистки талых вод, образующихся на территориях населенных пунктов. Для получения относительно недорогого сорбционного материала для извлечения из поверхностных сточных вод основных видов загрязнений предлагается использовать древесные отходы от опиловки городских насаждений.

Целью настоящей работы является исследование сорбционных свойств материала, полученного при обрезке городских деревьев. В работе проведено экспериментальное моделирование процесса сорбции растворенных нефтепродуктов и ионов меди из водного раствора на измельченных ветках тополя черного в статических условиях. Процесс сорбции изучался в соответствии с трехфакторным планом эксперимента. Лабораторное моделирование осуществлялось с целью определения оптимальных параметров очистки воды и степени взаимного влияния загрязнений на процесс сорбции. Природный материал, полученный из компонентов и отходов переработки тополей с городских территорий, проявил сорбционные свойства по отношению к нефтепродуктам и ионам меди в водной среде. Использование фильтров из измельченных веток городских насаждений в локальных очистных установках позволит решить сразу несколько задач коммунальных служб города: утилизацию отходов сезонной опиловки деревьев и эффективную очистку талого стока с низкими затратами на расходные фильтрующие материалы.

Ключевые слова: талые воды; фитосорбенты; сорбция; планирование эксперимента; уравнения регрессии.

Для цитирования: Воронов А.А., Максимова С.В., Осипова Е.Ю. Очистка талых вод урбанизированных территорий с использованием фитосорбентов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 105–117.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-105-117

A.A. VORONOV¹, S.V. MAKSIMOVA¹, E.Yu. OSIPOVA²,

¹Tyumen Industrial University,

²Tomsk State University of Architecture and Building

PURIFICATION OF MELT WATER WITH PLANT SORBENTS

The article deals with the problem of purification of melt water generated by the urbanized territories. It is proposed to use wood residue from sawing of plantings to obtain relatively inexpensive sorption material for the contamination extraction from surface wastewater. The aim of this work is to study the sorption properties of the material obtained by sawing of plantings. Experimental modeling of sorption of dissolved petroleum products and copper ions from an aqueous solution of milled branches of black poplar is carried out under static conditions. The sorption process is studied in accordance with a three-factor design experiment. Laboratory modeling determines the optimum parameters of water purification and the degree of mutual influence of contaminants on the sorption process. Natural material obtained from the poplar components shows the sorption properties in relation to oil products and copper ions in the water environment. The filters made of milled branches and used in local treatment plants will allow solving the problems of municipal services, namely utilization of wood residue from sawing of plantings and effective melt water purification due to the low-cost filtering materials.

Keywords: melt water, plant sorbents, sorption, design experiment, regression equation.

For citation: Voronov A.A., Maksimova S.V., Osipova E.Yu. Ochistka talykh vod urbanizirovannykh territorii s ispol'zovaniem fitosorbentov [Purification of urbanized melt water with plant sorbents]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 2. Pp. 105–117.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-105-117

Введение

Для городских дождевых и талых сточных вод характерна высокая степень неравномерности поступления в систему сбора и очистки. Качество и количество поверхностного стока существенно изменяются в зависимости от сезона и места формирования. Фактические значения концентраций загрязняющих веществ поверхностных сточных вод часто не соответствуют установленным в нормативной литературе примерным значениям. Это касается таких загрязняющих веществ, как нефтепродукты, хлориды и ионы тяжелых металлов [1].

Снежные полигоны, как накопители огромного количества городского снега, являются источниками талого поверхностного стока особого качества. В результате проведенного исследования в талых водах обнаружены весьма токсичные загрязнения, такие как свинец, медь, марганец, никель, цинк, железо и другие, содержание которых превышает установленные предельно допустимые концентрации (ПДК) в 1,2–12 раз. Эксплуатация подобных объектов приводит, как правило, к подтоплению прилегающих территорий. В результате миграции специфических загрязняющих веществ во внешнюю среду происходит деградация почв и водоемов. Рассматриваемые выше геоэкологические проблемы характерны для промышленных городов России, Европы и Азии [2].

Установлено, что концентрации загрязнений талого стока отдельных районов г. Тюмени существенно превышают нормативно допустимые значе-

ния, установленные для сброса в водный объект: по взвешенным веществам – в 1088 раз, ХПК – в 400 раз, нефтепродуктам – в 34 раза, хлоридам – в 26 раз и железу – в 805 раз [3, 4].

В Ханты-Мансийском автономном округе – Югре (ХМАО – Югре), на территории г. Нижневартовска, была проведена оценка экологического состояния городской среды. С помощью атомно-абсорбционной спектрофотометрии измерялось содержание тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd, Pb, Fe, Mn, Cr, Ni) в фильтрате талого снега и твердом остатке. В результате исследования было выявлено значительное увеличение (в 10–50 раз) содержания в твердой фракции ионов Mn, Ni, Fe, Zn по сравнению с фоновыми значениями [5].

Для территорий ХМАО – Югры, на которых ведется хозяйственная деятельность (добыча полезных ископаемых, производство сельскохозяйственной продукции), также характерно накопление снежными массами поллютантов. Изучение качественного состава снежных масс показало, что фоновые участки на нефтяных месторождениях характеризуются малой минерализацией (не более 50 мг/дм³) и невысоким содержанием твердых примесей (не более 20 мг/дм³). При этом концентрации нефтепродуктов в талых водах, образующихся на участках установки факелов сжигания попутного газа, возрастают в 2 раза. На участках нефтедобычи отчетливо выражен рост концентраций ряда тяжелых металлов (цинка, ртути, хрома и никеля), содержание которых может превышать нормы в 4–4,5 раза. На территории населенных пунктов наиболее велико загрязнение ртутью и нефтепродуктами [6].

Исследования, проведенные с 1996 по 2015 г. в Тверской области, показали, что в составе снежного покрова земель сельскохозяйственного значения обнаружены повышенные концентрации нитратов, хлоридов, сульфатов, а также наличие ионов свинца, кадмия, меди и других металлов. С целью предупреждения коррозии плодородных слоёв почвы талый снег должен подвергаться качественной очистке [7].

Современная проблема сбора и качественной очистки талого поверхностного стока характерна для территорий крупных городов, промышленных предприятий и сельскохозяйственных объектов. Применяемые технологические схемы очистки поверхностных сточных вод не учитывают в полной мере изменения количества и качества поверхностных сточных вод, связанных с увеличением доли водонепроницаемых покрытий селитебных зон и появлением новых видов техногенных загрязнений. Отсутствие данных по сезонному изменению специфических показателей качества воды усложняет выбор эффективных методов, сооружений и оборудования для локальных очистных станций (ЛОС) [3, 4].

В настоящее время на традиционных ЛОС применяются следующие методы очистки поверхностного стока: грубая первичная механическая очистка, отстаивание или флотация, доочистка от остаточных примесей с помощью фильтрования, ультрафиолетовое обеззараживание перед сбросом в водоем. Дополнительно могут использоваться реагенты с целью удаления специфических загрязнений, например ионов металлов и солей [8]. На стадии доочистки стоков сорбционные методы являются наиболее приемлемыми, легко поддаются автоматизации и не требуют больших эксплуатационных затрат [3].

В настоящее время активно ведется поиск эффективного, но относительно дешевого сорбционного материала для извлечения различных загрязнений из сточных вод. Интересны новые сорбционные материалы, полученные на основе природных материалов и отходов различных производств [9–15].

Для извлечения нефти и нефтепродуктов из сточных вод разработана полная классификация, в которую входят сорбенты на основе природных материалов и отходов производства. Классификация позволяет сделать комплексный анализ сорбционных материалов и выбрать наиболее оптимальный вариант для определенного состава стоков [10].

Большой интерес вызывают некоторые виды фитосорбентов, которые являются также отходами деревообрабатывающего производства и могут использоваться как сорбенты нефтепродуктов в технологиях очистки сточных вод. Интенсивно изучается сорбционная способность древесной стружки и опилок, отходов растениеводства, образующихся в процессе деятельности лесных и сельскохозяйственных предприятий в больших количествах. Данные материалы обладают всеми необходимыми свойствами для очистки воды, у них пористая структура, низкая плавучесть, высокая гидрофильность [11].

Опилки хорошо и быстро впитывают как нефть и нефтепродукты, так и влагу, но для повышения сорбционной активности необходимо предусматривать дополнительную модификацию их поверхности [12, 13]. Для этого можно использовать растворы кислот, щелочей с дальнейшей термообработкой в сушильном шкафу при различных температурах [14].

Например, предложен способ получения биоугольных материалов путем обработки коры осины и лиственницы 40%-м раствором формальдегида и последующей термической активацией модифицированной коры при температуре 350–900 °С. Полученный сорбент способен извлекать ионы меди из воды [15].

Доказано, что природные и модифицированные гидрозолы монтмориллонита способны извлекать ионы меди и никеля из водных растворов. В лабораторных условиях получены основные характеристики адсорбции ионов меди и никеля на монтмориллоните. Предложены оптимальные условия сорбционного извлечения ионов тяжелых металлов из водных растворов на природных и модифицированных монтмориллонитах [16].

Разработан и экспериментально проверен способ получения гранулированного сорбента для очистки сточных вод от ионов меди и цинка. В состав сорбента входит отход водоподготовки – железистый шлам, жидкое стекло, оксид кальция и вода. Степень извлечения ионов цинка составила 53,5 %, меди – 44,0 %. Внедрение данного сорбента в широкое производство позволит одновременно утилизировать отходы водоподготовки и обеспечить эффективными дешевыми сорбентами сооружения для очистки сточных вод [17].

Существует проблема утилизации большого количества древесных отходов от опиловки городских насаждений. Это связано с весьма существенными затратами на сбор, измельчение, вывоз и хранение данного материала на свалках ТБО. Предлагается несколько вариантов вторичного использования измельченных веток, которые позволят покрыть вышеперечисленные расходы [18].

В видовом составе древесной растительности, используемой для озеленения населенных мест, преобладают лиственные породы [19]. Среди древесных растений, используемых для создания искусственных насаждений г. Томска, наиболее часто встречаются береза, клен, тополь, яблоня [20].

Материалы, полученные из компонентов и отходов переработки лиственных деревьев, произрастающих в средней полосе России, обладают сорбционными свойствами по отношению к различным поллютантам (ионам тяжелых металлов, нефтепродуктам, красителям), растворенным в водной среде [21]. Так, автогидролиз бересты березы с последующей гидрофобизацией позволил увеличить нефтеемкость образцов сорбционного материала до 6,2–8,7 г/г [22]. Эффективность удаления ионов Cu^{2+} из водного раствора с исходной концентрацией 25 мг/дм³ сорбционным материалом из кленовых опилок с дозами сорбента 0,5–10 г/дм³ составила 61,75–82,27 % соответственно [23]. Применение опилок тополя для извлечения из водного раствора ионов Cu^{2+} с исходной концентрацией 0,2 г/дм³ в статических условиях позволило добиться эффекта очистки 80 % [24]. Данный вид отхода является природным материалом, который может быть рассмотрен в качестве сорбента на стадии доочистки ЛОС стока.

В выполненном исследовании проведено экспериментальное моделирование процесса сорбции растворенных нефтепродуктов и ионов меди из водного раствора на измельченных ветках тополя черного (*Populus nigra*) в статических условиях. Выбор материала связан с тем, что различные виды рода тополь (*Populus*) достаточно часто используются в озеленении населенных пунктов в России и за рубежом [19, 25, 26].

Цель исследования заключается в определении условий очистки поверхностного талого стока, поступающего с урбанизированной территории, с использованием природных фитосорбентов. Загрузка фильтров из измельченных веток городских насаждений (деревьев и кустов) в локальных очистных установках позволит решить сразу несколько задач коммунальных служб города: утилизации отходов сезонной опиловки деревьев и эффективной очистки талого стока с низкими затратами на расходные фильтрующие материалы.

Материалы и методы исследования

В качестве фитосорбента были использованы измельченные ветки тополя, полученные во время зимней обрезки зеленых насаждений города. Перед помещением в модельный раствор измельченные ветки были высушены в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре 105 °С и просеяны через сито с размером ячеек 2 мм. Мелкие опилки обладают лучшей сорбционной способностью, чем крупные, из-за увеличения площади поверхности [13].

Процесс сорбции изучался на водных растворах нефтепродуктов и меди с концентрациями соответственно: 2 и 0,5, 6 и 1, 10 и 1,5 мг/дм³. Для приготовления модельного водного раствора использовались: дистиллированная вода, медный купорос $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, масло для воздушных компрессоров Mobil Rarus SHC 1025.

Сорбция изучалась в статических условиях: обрабатываемая вода (100 см³) интенсивно перемешивалась с сорбентом (5 г), затем сорбент отделялся от воды в результате отстаивания. Концентрации нефтепродуктов и меди фиксировались в рабочих растворах в периоды 24, 48 и 72 ч.

Измерение массовой концентрации растворенных нефтепродуктов в водных растворах осуществлялось флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02-3М», основанным на экстракции гексаном нефтепродуктов из пробы воды и измерении интенсивности флуоресценции полученного экстракта на анализаторе жидкости с последующим автоматическим вычислением концентрации.

Концентрация меди в водных растворах определялась объемным методом – титрованием. Определение тяжелых металлов основано на взаимодействии ионов, находящихся в анализируемом растворе, с трилоном Б в присутствии аммиачной буферной смеси (рН~10). В 30 мл исходного водного раствора меди добавляли 5 мл аммиачного буферного раствора и металлоиндикатор (мурексид). Титрование производили 0,05 н.р. трилона Б до смены окраски раствора. По показаниям бюретки определялся объем раствора трилона Б, пошедшего на титрование.

Лабораторные опыты проводились в соответствии с трехфакторным планом. Статистические методы планирования эксперимента достаточно широко используются при моделировании процессов очистки воды [27].

Результаты исследований

В данной работе рассматривается процесс сорбции растворенных нефтепродуктов и ионов меди на измельченных ветках в статических условиях. Лабораторное моделирование осуществлялось с целью определения оптимальных параметров очистки воды и степени взаимного влияния загрязнений на процесс сорбции. В процессе эксперимента проведены две серии опытов согласно трехфакторному плану для определения сорбционной емкости фитосорбента по нефтепродуктам и по ионам меди [28]. В качестве входных изменяемых параметров были приняты следующие: X_1 – концентрация рабочего раствора нефтепродуктов (от 2 до 10 мг/дм³); X_2 – концентрация рабочего раствора ионов меди (от 0,5 до 1,5 мг/дм³); X_3 – продолжительность контакта раствора с фитосорбентом (от 24 до 72 ч).

Варьирование входных параметров проведено в трех уровнях (значения –1, 0, +1). Основной уровень, интервалы варьирования и границы области исследования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Интервалы варьирования факторов

Факторы	Наименование, обозначение	Интервалы варьирования (кодировка)		
		+1	0	–1
X_1	Концентрация нефтепродуктов в исходном растворе, мг/дм ³ ($C_{нп\text{исх}}$)	10	6	2
X_2	Концентрация ионов меди в исходном растворе, мг/дм ³ ($C_{м\text{исх}}$)	1,5	1,0	0,5
X_3	Продолжительность контакта раствора с фитосорбентом, ч (T)	72	48	24

В качестве выходного параметра $Y01$ ($C_{нп_вых}$, мг/дм³) принята остаточная концентрация нефтепродуктов после сорбции на измельченных ветках, которая характеризует эффективность очистки воды от нефтепродуктов. В качестве выходного параметра $Y02$ ($C_{м_вых}$, мг/дм³) принята остаточная концентрация ионов меди после сорбции на измельченных ветках, которая характеризует эффективность очистки воды от ионов металла. В середине эксперимента опыты проводились в трех параллелях с целью определения средних значений и погрешностей измерений.

Результаты опытов обрабатывались методами математической статистики [27, 28]. Матрица планирования и результаты эксперимента, а именно остаточные концентрации нефтепродуктов и ионов меди после сорбции, сведены в табл. 2.

Таблица 2

Трехфакторный план эксперимента и результаты моделирования

№ опыта	X_1	X_2	X_3	$C_{нп_исх}$, мг/дм ³	$C_{м_вых}$, мг/дм ³	T , ч	$Y01$	$Y02$
1	-1	-1	-1	2	0,5	24	1,345	0,474
2	+1	-1	-1	10	0,5	24	3,81	0,49
3	-1	+1	-1	2	1,5	24	1,815	1,158
4	+1	+1	-1	10	1,5	24	3,48	0,88
5	-1	-1	+1	2	0,5	72	1,255	0,386
6	+1	-1	+1	10	0,5	72	5,47	0,5
7	-1	+1	+1	2	1,5	72	1,43	0,794
8	+1	+1	+1	10	1,5	72	4,35	1,202
9	0	0	0	6	1	48	2,422	0,632

На основании полученных данных рассчитаны погрешности измерений и получены коэффициенты регрессии для двух модельных уравнений первого порядка (1). Определена значимость коэффициентов регрессии, проверено соответствие критериям Стьюдента и Фишера, с учетом которых кодированные уравнения (2) и (3) адекватно описывают процессы сорбции нефтепродуктов и ионов меди из охлажденных водных растворов.

Уравнение регрессии первого порядка, описывающее процессы сорбции загрязнений на измельченных ветках тополя, имеет общий вид

$$Y0 = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{23}X_2X_3 + a_{13}X_1X_3 + a_{123}X_1X_2X_3. \quad (1)$$

Уравнение с рассчитанными в программном продукте Excel коэффициентами регрессии, описывающими процесс сорбции нефтепродуктов на измельченных ветках:

$$Y01 = 2,820 + 1,408X_1 - 0,1X_2 + 0,257X_3 - 0,262X_1X_2 - 0,135X_2X_3 + 0,375X_1X_3 - 0,062X_1X_2X_3. \quad (2)$$

На основании полученного уравнения (2) был проведен графический анализ влияния факторов X_1 , X_2 и X_3 на сорбцию растворенных нефтепродуктов (рис. 1).

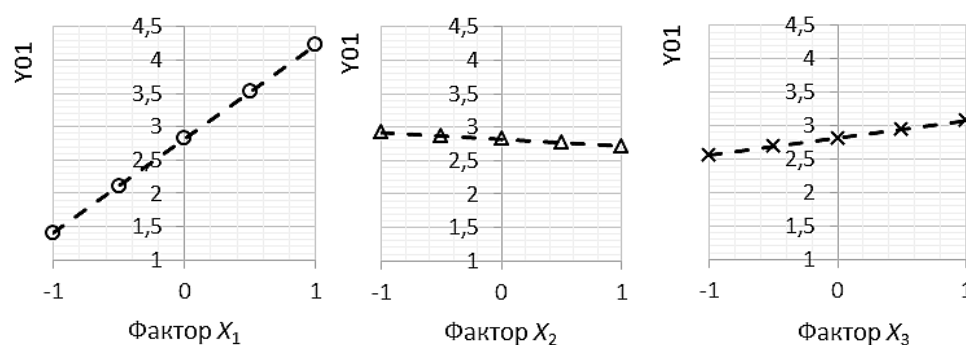


Рис. 1. Анализ влияния факторов X_1 , X_2 и X_3 на сорбцию нефтепродуктов из водных растворов

Наиболее влияющей на сорбцию является исходная концентрация нефтепродуктов в воде (фактор X_1). Наблюдается прямо пропорциональная зависимость: чем больше исходная концентрация загрязнения, тем больше остаточная концентрация нефтепродуктов в пробе. Это подтверждает тот факт, что исследуемый фитосорбент имеет предельное нефтепоглощение, после достижения которого материал практически перестает сорбировать загрязнения из воды. В этот момент достигается предельная сорбционная емкость.

Фактор X_2 (исходная концентрация ионов меди) практически не оказывает влияния на сорбционные свойства по нефтепродуктам (изменение результата в пределах погрешности измерения 6–7 %).

Фактор X_3 (продолжительность контакта модельного раствора с сорбентом) оказывает незначительное влияние на сорбционные свойства древесной крошки по нефтепродуктам, которое происходит за счет некоторого выделения части нефтепродуктов обратно в воду в результате длительного контакта: наблюдалось повышение остаточной концентрации на 15 % после контакта в течение 72 ч. Чтобы выход сорбированных нефтепродуктов в статических условиях не превышал 10 %, необходимо продолжительность контакта сократить до 48 ч.

Уравнение регрессии первого порядка с учетом только значимых коэффициентов, описывающее процесс сорбции ионов меди на измельченных ветках, имеет вид

$$Y02 = 0,724 + 0,033X_1 + 0,273X_2 - 0,015X_3 + 0,098X_2X_3 + 0,074X_1X_2X_3. \quad (3)$$

Полученное уравнение (3) позволило провести графический анализ влияния факторов X_1 , X_2 и X_3 на сорбцию ионов меди (рис. 2).

Наиболее влияющей на сорбцию ионов меди является исходная концентрация меди в воде (фактор X_2). Наблюдается прямо пропорциональная зависимость: чем больше исходная концентрация загрязнения, тем больше остаточная концентрация ионов меди в воде. Это объясняется тем, что после достижения предельной сорбционной емкости материал перестает сорбировать загрязнения из пробы модельного раствора.

Фактор X_1 (исходная концентрация нефтепродуктов) практически не оказывает влияния на сорбционные свойства по ионам меди (изменение результата в пределах погрешности измерения 8–9 %).

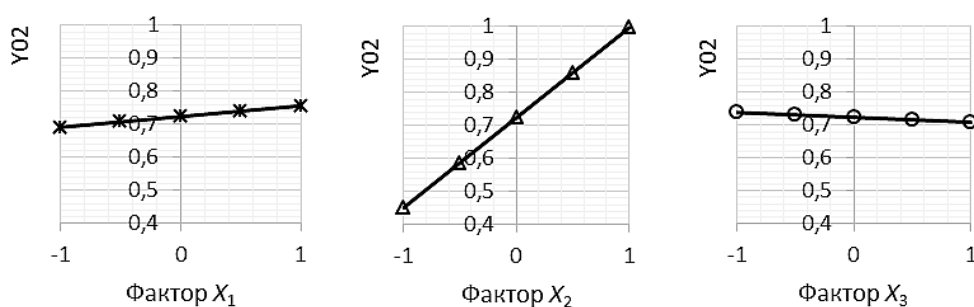


Рис. 2. Анализ влияния факторов X_1 , X_2 и X_3 на сорбцию ионов меди из водных растворов

Фактор X_3 (продолжительность контакта модельного раствора с сорбентом) также не оказывает влияния на сорбционные свойства исследуемого материала по ионам (отклонение от нулевого значения не превышает 4–5 %). Это говорит о том, что сорбционные центры сорбента более прочно удерживают ионы меди, чем нефтепродукты, которые в большей степени выделяются обратно в пробу после длительного контакта (остаточная концентрация возрастает на 15 %).

При изучении полученных модельных уравнений выяснилось, что значение сорбционной емкости для используемого фитосорбента по отношению к нефтепродуктам составило 0,17 мг/г; значение сорбционной емкости по ионам меди – 0,01 мг/г.

Заключение

Природный материал, полученный из компонентов и отходов переработки лиственных деревьев (тополей) с урбанизированных территорий, проявил сорбционные свойства по отношению к нефтепродуктам и ионам меди в водной среде.

В результате проведенных исследований определены значения сорбционной емкости: 0,17 мг/г (по нефтепродуктам) и 0,007 мг/г (по ионам меди Cu^{+2}). Оптимальные условия протекания процесса сорбции в статических условиях: время контакта – не более 48 ч (в этом случае обратный выход загрязнения в воду не превышает 10 %), исходные концентрации по нефтепродуктам – 2–10 мг/дм³, по ионам меди – 0,5–1,5 мг/дм³.

Взаимное влияние концентрации нефтепродуктов и ионов меди на процесс сорбции практически отсутствует. Медь занимает более прочное положение внутри фитосорбента и практически не выходит в раствор при длительном контакте.

Таким образом, образующийся талый сток вполне может очищаться с использованием природных измельченных веток городских насаждений (деревьев и кустов) в локальных очистных установках. Этот способ позволит решить проблему сокращения объемов и утилизации отходов сезонной опилочки деревьев. При этом становится возможным внедрить эффективную и малозатратную очистку поверхностных сточных вод.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Vialkova E., Zemlyanova M., Vorotnikova A., Cherkashin D., Voronov A., Maksimov L. The protection of urban areas from surface wastewater pollution // MATEC Web of Conferences. 2017. V. 106. 07008. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201710607008>
2. Лобкина В., Михалев М. Оценка опыта эксплуатации снежных полигонов в России, альтернативные способы борьбы со снегом // Экология и промышленность России. 2019. № 23 (1). С. 60–65. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-1-60-65>
3. Vialkova E., Maksimova S., Malyshkina E., Voronov A., Zemlyanova M., Maksimov L. Conceptual approach to the creation of “smart” sewerage system for city surface runoff // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 365. 022001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/2/022001>
4. Воронов А.А., Малышкина Е.С., Вялкова Е.И., Максимова С.В. Совершенствование рациональных городских инженерных систем очистки поверхностных сточных вод // Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8. № 3. С. 43–50. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2018.03.10>
5. Пожитков Р.Ю., Московченко Д.В., Кудрявцев А.А. Геохимия снежного покрова г. Нижневартовска // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2018. Т. 4. № 1. С. 6–24.
6. Московченко Д.В., Бабушкин А.Г. Особенности формирования химического состава снеговых вод на территории Ханты-Мансийского автономного округа // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 1. С. 71–81.
7. Бабкина А.А., Зубкова В.М., Белозубова Н.Ю., Горбунова В.А. Анализ загрязненности снежного покрова в условиях антропогенной нагрузки // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2016. № 4. С. 78–87. DOI: 10.18384/2310-7189-2016-4-78-87
8. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов: ИТС 10-2019. Москва : БюроНДТ, 2019. 434 с.
9. Pimneva L., Malyshkina E., Salnikova E. Regularities of Sorption of Cations of Zinc and Copper by Natural Sorbent // Procedia Engineering. 2016. 165. P. 853–859.
10. Малышкина Е.С. Классификация сорбентов, используемых в технологиях очистки сточных вод от нефтепродуктов // Градостроительство и архитектура. 2020. Т.10. № 3. С. 26–34. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2020.03.5>
11. Малышкина Е.С., Вялкова Е.И., Осипова Е.Ю. Использование природных сорбентов в процессе очистки воды от нефтепродуктов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 1. С. 188–200. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2019-21-1-188-200>
12. Ikenyiri P.N., Ukpaka C.P. Overview on the Effect of Particle Size on the Performance of Wood Based Adsorbent // Journal of Chemical Engineering & Process Technology. 2016. V. 7. 315. DOI: 10.4172/2157-7048.1000315
13. Ismail A.S. Preparation and evaluation of fattysawdust as a natural biopolymer for oil spill sorption // Chemistry Journal. 2015. V. 5. No. 5. Pp. 80–85.
14. Rafeah Wahi, Luqman Abdullah Chuah, Thomas Shean Yaw Choong, Zainab Ngaini, Mohsen Mobarekeh Nourouzi. Oil removal from aqueous state by natural fibrous sorbent: An overview // Separation and Purification Technology. 2013. 113. P. 51–63.
15. Микова Н.М., Скворцова Г.П., Мазурова Е.В., Чесноков Н.В. Влияние сшивающего эффекта на свойства сорбентов, получаемых из коры осины и лиственницы // Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92. Вып. 10. С. 1333–1343. DOI: 10.1134/S0044461819100128
16. Свиридов А.В., Юрченко В.В., Свиридов В.В., Ганебных Е.В. Сорбция катионов меди и никеля на слоистых алюмосиликатах // Сорбционные и хроматографические процессы. 2016. Т. 16. № 1. С. 78–86.
17. Лукашевич О.Д., Усова Н.Т. Сорбент из железистого шлама для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 1. С. 148–159. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2018-20-1-148-159>

18. Шаталов П.В., Подкопаева А.Л. Инновационный подход к утилизации древесных отходов при опилковке городских насаждений в г. Воронеже // Инновации, технологии и бизнес. 2020. № 1 (7). С. 102–108.
19. Горяева Е.В., Мохирев А.П. Инвентаризация зеленых насаждений с использованием ГИС-технологий на примере города Лесосибирска // Лесной журнал. 2015. № 2. С. 80–89.
20. Куклина Т.Э., Мерзлякова И.Е. Ассортимент древесных растений, используемых в озеленении г. Томска // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2013. № 4 (24). С. 47–66. doi: 10.17223/19988591/24/4
21. Денисова Т.Р., Шайхиев И.Г. Использование компонентов лиственных деревьев средней полосы России в качестве сорбционных материалов для удаления поллютантов из водных сред. Обзор литературы // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 24. С. 145–158.
22. Венрикова Е.В., Терещенко Е.А., Чесноков Н.В., Кузнецов Б.Н. Использование бересты коры березы для получения сорбционных материалов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2012. Т. 5. № 2. С. 178–188.
23. Rahman M.S., Islam M.R. Effects of pH on Isotherms Modeling for Cu (II) Ions Adsorption Using Maple Wood Sawdust // Chemical Engineering Journal. 2009. V. 149. P. 273–280. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.11.029>
24. Stankovic V., Bozic D., Gorgievski M., Bogdanovic G. Heavy metal ions adsorption from mine water by sawdust // Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly. 2009. V. 15. I. 4. P. 237–249. DOI:10.2298/CICEQ0904237S
25. Бессчетнов П.В., Бессчетнова Н.Н. Корреляция параметров листового аппарата тополей в условиях городских посадок // Вестник Казанского ГАУ. 2018. № 1 (48). С. 5–10. DOI 10.12737/article_5afafe02978e82.68901305
26. Cooke J.E.K., Rood S.B. Trees of the people: the growing science of poplars in Canada and worldwide // Canadian Journal of Botany. 2007. V. 85. P. 1103–1110. DOI: 10.1139/B07-125
27. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. Москва : Высшая школа, 1985. 327 с.
28. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. Москва : Финансы и статистика, 1981. 263 с.

REFERENCES

1. Vialkova E., Zemlyanova M., Vorotnikova A., Cherkashin D., Voronov A., Maksimov L. The protection of urban areas from surface wastewater pollution. *MATEC Web of Conferences*. 2017. V. 106. 07008. DOI: 10.1051/mateconf/201710607008
2. Lobkina V., Mikhalev M. Otsenka opyta ekspluatatsii snezhnykh poligonov v Rossii, al'ternativnye sposoby bor'by so snegom [Assessment of operating experience of snow polygons in Russia, alternative ways of dealing with snow]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2019. No. 23 (1). Pp. 60–65. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-1-60-65 (rus)
3. Vialkova E., Maksimova S., Malyshkina E., Voronov A., Zemlyanova M., Maksimov L. Conceptual approach to the creation of “smart” sewerage system for city surface runoff. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. V. 365. 022001. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022001
4. Voronov A.A., Malyshkina E.S., Vyalkova E.I., Maksimova S.V. Sovershenstvovanie ratsional'nykh gorodskikh inzhenernykh sistem ochistki poverkhnostnykh stochnykh vod [Urban engineering systems for surface wastewater treatment]. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura*. 2018. V. 8. No. 3. Pp. 43–50. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.03.10 (rus)
5. Pozhitkov R.Yu., Moskovchenko D.V., Kudryavtsev A.A. Geokhimiya snezhnogo pokrova g. Nizhnevartovska [Geochemistry of snow cover in Nizhnevartovsk]. *Ekologiya i prirodopol'zovanie*. 2018. V. 4. No. 1. Pp. 6–24. (rus)
6. Moskovchenko D.V., Babushkin A.G. Osobennosti formirovaniya khimicheskogo sostava snegovykh vod na territorii Khanty-Mansiiskogo avtonomnogo okruga [Chemical composition of snow waters (the Khanty-Mansi case studies)]. *Kriosfera Zemli*. 2012. V. 15. No. 1. Pp. 71–81. (rus)
7. Babkina A.A., Zubkova V.M., Belozubova N.Yu., Gorbunova V.A. Analiz zagryaznennosti snezhnogo pokrova v usloviyakh antropogennoi nagruzki [Analysis of snow cover pollution

- under anthropogenic conditions]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*. 2016. No. 4. Pp. 78–87. DOI: 10.18384/2310-7189-2016-4-78-87 (rus)
8. Ochistka stochnykh vod s ispol'zovaniem tsentralizovannykh sistem vodootvedeniya poselenii, gorodskikh okrugov [Wastewater treatment in centralized sewerage systems of settlements, urban districts]. Moscow: ByuroNDT, 2019. 434 p. (rus)
 9. Pimneva L., Malyshkina E., Salnikova E. Regularities of sorption of cations of zinc and copper by natural sorbent. *Procedia Engineering*. 2016. 165. Pp. 853–859.
 10. Malyshkina E.S. Klassifikatsiya sorbentov, ispol'zuemykh v tekhnologiyakh ochistki stochnykh vod ot nefteproduktov [Classification of sorbents used in waste water purification from petroleum products]. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura*. 2020. V. 10. No. 3. Pp. 26–34. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.03.5 (rus)
 11. Malyshkina E.S., Vyalkova E.I., Osipova E.Yu. Ispol'zovanie prirodnykh sorbentov v protsesse ochistki vody ot nefteproduktov [Water purification with natural sorbents]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2019. V. 21. No. 1. Pp. 188–200. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-1-188-200 (rus)
 12. Ikenyiri P.N., Ukpaka C.P. Overview on the effect of particle size on the performance of wood based adsorbent. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*. 2016. V. 7. 315. DOI: 10.4172/2157-7048.1000315.
 13. Ismail A.S. Preparation and evaluation of fatty sawdust as a natural biopolymer for oil spill sorption. *Chemistry Journal*. 2015. V. 5. No. 5. Pp. 80–85.
 14. Rafeah Wahi, Luqman Abdullah Chuah, Thomas Shean Yaw Choong, Zainab Ngaini, Mohsen Mobarekeh Nourouzi. Oil removal from aqueous state by natural fibrous sorbent: An overview. *Separation and Purification Technology*. 2013. V. 113. Pp. 51–63.
 15. Mikova N.M., Skvortsova G.P., Mazurova E.V., Chesnokov N.V. Vliyanie sshivayushchego effekta na svoystva sorbentov, poluchaemykh iz kory osiny i listvennitsy [Cross-linking effect on sorbent properties obtained from bark of aspen and larch]. *Zhurnal prikladnoi khimii*. 2019. V. 92. No. 10. Pp. 1333–1343. DOI: 10.1134/S0044461819100128 (rus)
 16. Sviridov A.V., Yurchenko V.V., Sviridov V.V., Ganebnykh E.V. Sorbtsiya kationov medi i nikelya na sloistykh alyumosilikatakh [Sorption of copper and nickel cations in layered aluminum silicates]. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2016. V. 16. No. 1. Pp. 78–86. (rus)
 17. Lukashevich O.D., Usova N.T. Sorbent iz zhelezistogo shlama dlya ochistki stochnykh vod ot ionov tyazhelykh metallov [Iron sludge sorbing agent for sewage purification from heavy metal ions]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2018. V. 20. No. 1. Pp. 148–159. DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-1-148-159 (rus)
 18. Shatalov P.V., Podkopaeva A.L. Innovatsionnyi podkhod k utilizatsii drevesnykh otkhodov pri opilovke gorodskikh nasazhdenii v g. Voronezhe [Innovative approach to wood waste disposal in sawing of urban plantations in Voronezh]. *Innovatsii, tekhnologii i biznes*. 2020. No. 1 (7). Pp. 102–108. (rus)
 19. Goryaeva E.V., Mokhirev A.P. Inventarizatsiya zelenykh nasazhdenii s ispol'zovaniem GIS-tekhnologii na primere goroda Lesosibirsk [Inventory of green planting using geographic information systems technology in Lesosibirsk]. *Lesnoi zhurnal*. 2015. No. 2. Pp. 80–89. (rus)
 20. Kuklina T.E., Merzlyakova I.E. Assortiment drevesnykh rastenii, ispol'zuemykh v ozelenenii g. Tomska [Assortment of woody plants used in Tomsk landscape gardening]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*. 2013. No. 4 (24). Pp. 47–66. DOI: 10.17223/19988591/24/4 (rus)
 21. Denisova T.R., Shaikhiev I.G. Ispol'zovanie komponentov listvennykh derev'ev srednei polosy Rossii v kachestve sorbtsionnykh materialov dlya udaleniya pollyutantov iz vodnykh sred. Obzor literatury [Deciduous tree components of central Russia as sorption materials for removing pollutants from aquatic environments. Literature review]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2017. V. 20. No. 24. Pp. 145–158. (rus)
 22. Veprikova E.V., Tereshchenko E.A., Chesnokov N.V., Kuznetsov B.N. Ispol'zovanie beresty kory berezy dlya polucheniya sorbtsionnykh materialov [Use of birch bark for sorption materials]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Khimiya*. 2012. V. 5. No. 2. Pp. 178–188. (rus)

23. Rahman M.S., Islam M.R. Effects of pH on isotherms modeling for Cu (II) ions adsorption using maple wood sawdust. *Chemical Engineering Journal*. 2009. V. 149. Pp. 273–280. DOI: 10.1016/j.cej.2008.11.029
24. Stankovic V., Bozic D., Gorgievski M., Bogdanovic G. Heavy metal ions adsorption from mine water by sawdust. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*. 2009. V. 15. No. 4. Pp. 237–249. DOI:10.2298/CICEQ0904237S
25. Besschetnov P.V., Besschetnova N.N. Korrelyatsiya parametrov listovogo apparata topolei v usloviyakh gorodskikh posadok [Parameter correlation of poplar leaf apparatus in urban landing conditions]. *Vestnik Kazanskogo GAU*. 2018. No. 1 (48). Pp. 5–10. DOI: 10.12737/article_5afafe02978e82.68901305 (rus)
26. Cooke J.E.K., Rood S.B. Trees of the people: the growing science of poplars in Canada and worldwide. *Canadian Journal of Botany*. 2007. V. 85. Pp. 1103–1110. DOI: 10.1139/B07-125
27. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoi tekhnologii [Experiment optimization methods in chemical technology]. Moscow: Vysshaya shkola, 1985. 327 p. (rus)
28. Voznesenskii V.A. Statisticheskie metody planirovaniya eksperimenta v tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniyakh [Statistical methods of design experiment in feasibility studies]. Moscow: Finansy i statistika, 1981. 263 p. (rus)

Сведения об авторах

Воронов Андрей Александрович, аспирант, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, teplooo@mail.ru

Максимова Светлана Валентиновна, канд. техн. наук, профессор, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, maksimovasv@tyuiu.ru

Осипова Елена Юрьевна, канд. геол.-мин. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kaf_wiw@tsuab.ru

Authors Details

Andrey A. Voronov, Research Assistant, Tyumen Industrial University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, teplooo@mail.ru

Svetlana V. Maksimova, PhD, Professor, Tyumen Industrial University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, maksimovasv@tyuiu.ru

Elena Yu. Osipova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kaf_wiw@tsuab.ru

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-118-132

С.В. ЮЩУБЕ, И.И. ПОДШИВАЛОВ,

Томский государственный архитектурно-строительный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВАНИЯ КИРПИЧНОГО ЗДАНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ЭТАЖНОСТИ НА МОНОЛИТНОЙ ФУНДАМЕНТНОЙ ПЛИТЕ

Определение податливости монолитных фундаментных плит на естественном основании является весьма актуальной задачей при расчете кирпичных зданий повышенной этажности точечного типа с пространственной перекрестно-стеновой конструктивной системой. При неупругой работе грунта по контуру монолитной фундаментной плиты допускается появление зоны предельного и упругопластического состояния грунта при обеспечении несущей способности основания в целом. В этом случае определяющим является выполнение нормативных условий по деформациям и перемещениям основания. Моделирование напряженно-деформированного состояния основания, монолитной фундаментной плиты и надземной части здания системы «основание – фундамент – здание» выполнено в ПК *МіcroFe* как единого целого. Учет неупругих деформаций грунта в основании привел к недопустимым перемещениям плитного фундамента.

Ключевые слова: кирпичное здание; фундаментная плита; основание; моделирование; расчет; линейный; нелинейный; напряжения; деформации.

Для цитирования: Ющубе С.В., Подшивалов И.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния основания кирпичного здания повышенной этажности на монолитной фундаментной плите // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 118–132.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-118-132

S.V. YUSHCHUBE, I.I. PODSHIVALOV,

Tomsk State University of Architecture and Building

STRESS-STRAIN STATE FINITE ELEMENT MODELING OF CONCRETE FOUNDATION OF A MULTISTORY BRICK BUILDING

The determination of mobility of the concrete foundation on a natural subgrade is rather relevant for the strength analysis of multistory brick buildings with a spatial cross-wall struc-

tural system. During the inelastic soil behavior, its ultimate limit and elastoplastic states are allowable along the concrete foundation perimeter, the bearing capacity of the foundation being provided as a whole. In this case, it is important to adhere to the standard conditions of the foundation deformation and mobility. The finite element modeling of the stress-strain state of the concrete foundation and the building superstructure of the base-foundation-building system is performed in the MicroFe software package. A consideration of inelastic soil deformations in the natural subgrade results in unacceptable displacements of the concrete foundation.

Keywords: brick building; concrete foundation; base; modeling; analysis; linear; nonlinear; stress; strain.

For citation: Yushchube S.V., Podshivalov I.I. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya osnovaniya kirpichnogo zdaniya povyshennoi etazhnosti na monolitnoi fundamentnoi plite [Stress-strain state finite element modeling of concrete foundation of a multistory brick building]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 2. Pp. 118–132.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-118-132

При расчете кирпичных зданий повышенной этажности, которые по конструктивной схеме относятся к перекрестно-стеновым пространственным системам, учет податливости фундаментов на естественном основании весьма актуален [1]. Выбор расчетной модели, которая может наиболее полно отразить конструктивную схему здания, является одним из важнейших факторов при определении напряженно-деформированного состояния строительных конструкций, фундаментов и оснований [2–4].

Модель линейно-деформированного основания, в которой грунтовая среда представляется упругим материалом, основана на двух допущениях: осадка точки поверхности основания прямо пропорциональна величине нагрузки в этой точке; осадки распространяются за пределы площади нагружения [5, 6].

В соответствии с действующими нормами предельное состояние по несущей способности свайных фундаментов наступает в случае, если усилие хотя бы в одной свае превысит расчетную нагрузку, допускаемую на сваю [7]. При этом предельное состояние при расчете по деформациям еще, как правило, не наступило. В фундаментах на естественном основании ситуация противоположная – допускается появление зоны предельного состояния, за которой располагается зона упругопластического состояния, а за ней – область упругой отдачи [8] при обеспечении несущей способности основания в целом по первой группе предельных состояний. В этом случае определяющим является выполнение условий по второй группе предельных состояний по деформациям и перемещениям основания.

Расчетным путем было установлено, что если в основании под фундаментной плитой нагрузка от здания соответствует вертикальным природным напряжениям на уровне подошвы фундаментной плиты, то развитие пластических деформаций в основании происходит в контурной зоне фундаментной плиты [9, 10].

Для более точного расчета деформаций оснований можно использовать модели, учитывающие нелинейную зависимость между напряжениями и деформациями [11, 12]. В некоторых упругопластических моделях при вводе прочностных характеристик грунтов можно учесть нелинейный характер де-

формирования основания. Критерий предельного состояния в этом случае представлен в виде поверхности в пространстве трех главных напряжений, например предельная поверхность, определяемая критерием Кулона – Мора.

ПВК MicroFe может учитывать неупругие свойства грунта по теории прочности Кулона – Мора и по «шатровой» модели работы грунта Cam-Clay, а также позволяет реализовать конечно-элементное моделирование системы «основание – фундамент – здание» в одной модели [13, 14].

Рассматриваемое 16-этажное кирпичное здание точечного типа имеет размеры в плане по габаритным осям 25,32×16,35 м, высота этажа – 2,8 м, общая высота здания с учетом подвала и технического этажа с лифтовой надстройкой – 56,34 м. Наружные и внутренние стены имеют толщину 770 и 510 мм соответственно. Несущими элементами перекрытий являются сборные железобетонные многпустотные плиты толщиной 220 мм различной длины и ширины. Стены подвала выполнены из сборных бетонных стеновых блоков толщиной 500 и 800 мм. Фундамент – плоская монолитная фундаментная плита (МФП) толщиной 1200 мм с габаритными размерами 28,23×20,6 м.

Инженерно-геологический разрез площадки строительства с привязкой МФП, основные физико-механические характеристики грунтов приведены соответственно на рис. 1 и в таблице.

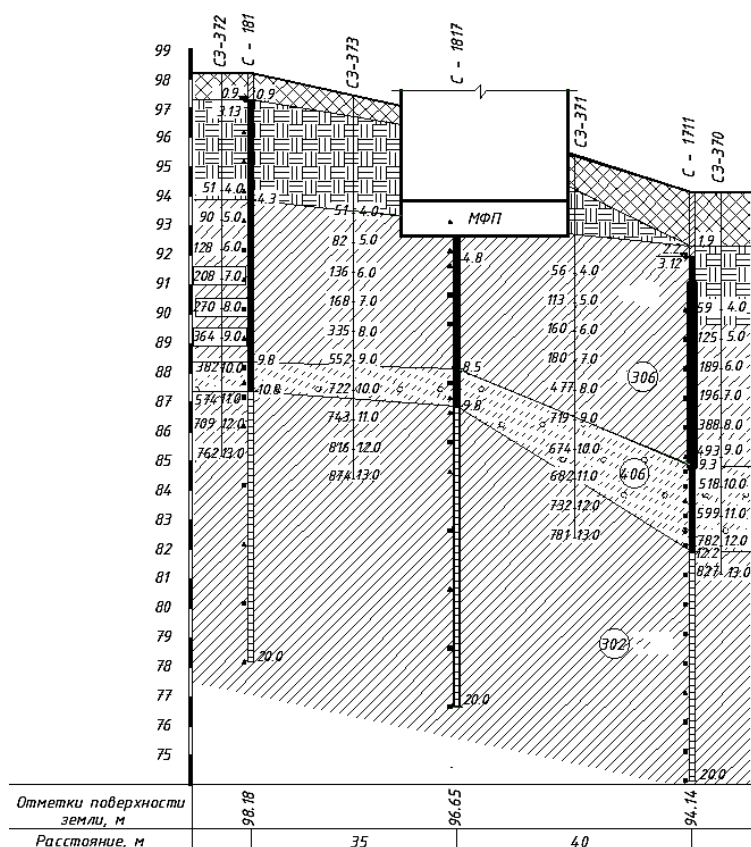


Рис. 1. Инженерно-геологический разрез с посадкой МФП

Основные физико-механические характеристики грунтов

№ ИГЭ слоя	Описание грунтов	Плотность ρ , т/м ³	Текучесть I_L	Угол внутреннего трения φ , град	Удельное сцепление C , МПа	Модуль деформации E , МПа
306	Суглинок аллювиальный текучей консистенции	1,95	1	20	21	11
406	Супесь гравелистая текучей консистенции	2,02	1	31	8	45
302	Суглинок элювиальный полутвердой консистенции	2,00	0,11	23	31	31

В расчетной модели кирпичные и бетонные стены, диски перекрытий и МФП моделировались конечным элементом типа «плоский прямоугольный элемент оболочки». Грунтовое основание под МФП принималось в виде трехслойного основания из объемных конечных элементов.

Конструктивная и расчетная конечно-элементная модель кирпичного здания на монолитной фундаментной плите представлена на рис. 2.

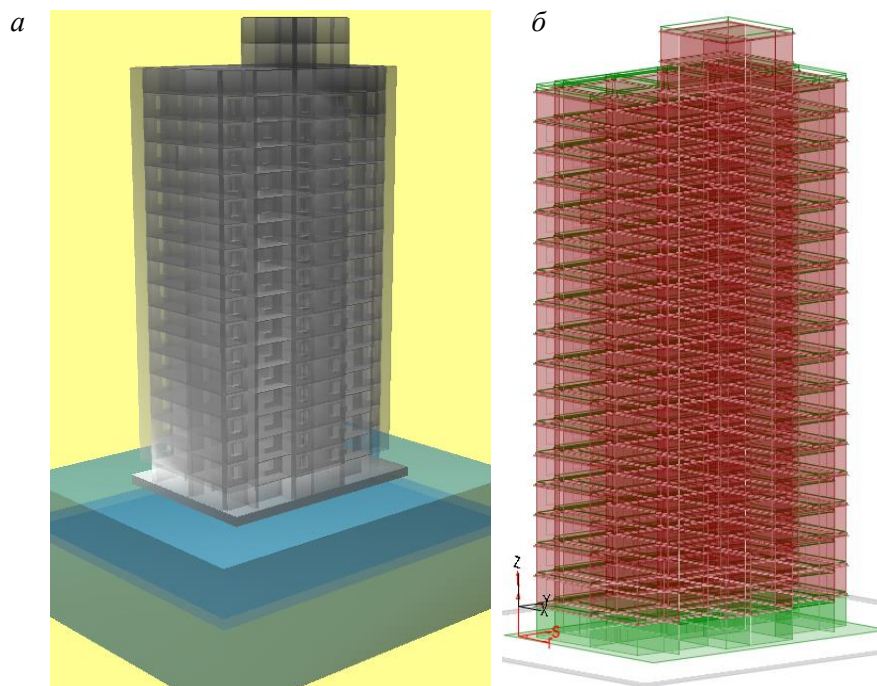


Рис. 2. Конструктивная (а) и расчетная (б) конечно-элементная модель

Расчет выполнялся с использованием двух расчетных схем:

– расчетная схема № 1 – линейный расчет грунтового основания с послойным заданием модуля деформации и коэффициента Пуассона;

– расчетная схема № 2 – нелинейный расчет грунтового основания с использованием теории прочности Кулона – Мора с послойным заданием модуля деформации, коэффициента Пуассона, плотности, сцепления, угла внутреннего трения (без учета дилатансии), коэффициента всестороннего сжатия (принят равным нулю). При расчете с учетом неупругой работы грунта на первом этапе моделируется напряженно-деформированное состояние основания от собственного веса грунта, затем на втором этапе моделируется напряженно-деформированное состояние основания с нагрузкой от здания.

Напряженное состояние

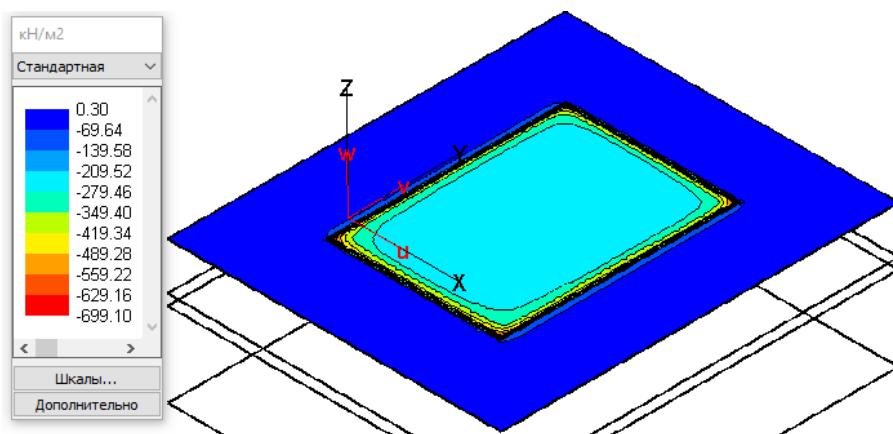
Расчетная схема № 1. При линейном деформировании основания получены следующие значения изополей нормальных напряжений (далее напряжения) в грунте по характерным сечениям:

– Горизонтальное сечение на уровне подошвы МФП на отм. –4,000 (рис. 3). Вертикальные напряжения за контуром МФП изменяются от нулевых значений на периферии основания до сжимающих значений $-69,6 \text{ кН/м}^2$ в направлении к МФП. В контурной зоне МФП вертикальные напряжения в грунте достигают наибольших значений и находятся в интервале $-279,4 \dots -699,1 \text{ кН/м}^2$. Во внутренней части основания вертикальные напряжения в целом стабильны и располагаются в диапазоне $-209,5 \dots -279,5 \text{ кН/м}^2$. Горизонтальные напряжения за контуром МФП изменяются от растягивающих значений $21,7 \text{ кН/м}^2$ на периферии основания до сжимающих значений $-37,5 \text{ кН/м}^2$ в направлении к МФП. В контурной зоне МФП горизонтальные напряжения в грунте достигают максимальных значений и изменяются от $-126,3$ до $-274,2 \text{ кН/м}^2$. Во внутренней части основания горизонтальные напряжения находятся в диапазоне $-67,1 \dots -126,3 \text{ кН/м}^2$ и на 55...68 % меньше соответствующих вертикальных сжимающих напряжений.

– Вертикальное сечение в плоскости XZ (рис. 4). Вертикальные напряжения за контуром МФП изменяются от нулевых значений на отм. –4,000 до сжимающих значений $-137,9 \text{ кН/м}^2$ на отм. –20,000 (низ отметки основания). В контурной зоне МФП вертикальные напряжения в грунте на отм. –4,000 достигают наибольших значений и находятся в интервале $-275,8 \dots -459,7 \text{ кН/м}^2$, на отм. –20,000 значительно уменьшаются и составляют $-135,1 \text{ кН/м}^2$. Во внутренней зоне основания вертикальные напряжения на отм. –4,000 располагаются в диапазоне $-183,9 \dots -230,0 \text{ кН/м}^2$, на отм. –20,000 незначительно уменьшаются и находятся в интервале $-137,9 \dots -183,9 \text{ кН/м}^2$. Горизонтальные напряжения за контуром МФП на отм. –4,000 изменяются от растягивающих значений $21,5 \text{ кН/м}^2$ до сжимающих значений $-2,6 \text{ кН/м}^2$, на отм. –20,000 возникают только сжимающие горизонтальные напряжения в диапазоне $-26,9 \dots -51,3 \text{ кН/м}^2$. В контурной зоне МФП горизонтальные сжимающие напряжения в грунте на отм. –4,000 достигают наибольших значений и находятся в интервале $-194,7 \dots -218,7 \text{ кН/м}^2$, на отм. –20,000 значительно уменьшаются и составляют $-50,6 \dots -74,6 \text{ кН/м}^2$. Во внутренней части основа-

ния горизонтальные напряжения на отм. $-4,000$ располагаются в диапазоне $-74,6 \dots -98,6 \text{ кН/м}^2$, на отм. $-20,000$ незначительно уменьшаются и находятся в интервале $-50,6 \dots -74,6 \text{ кН/м}^2$.

а



б

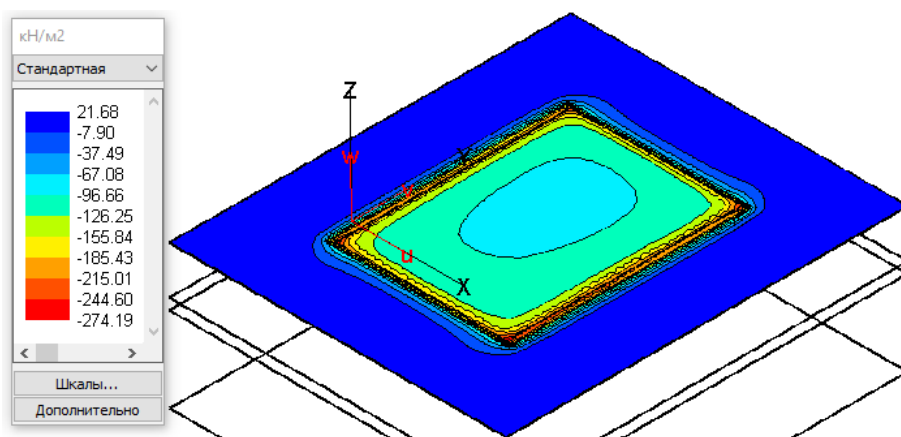


Рис. 3. Изополя нормальных напряжений в грунте в расчетной схеме № 1 на уровне подошвы МФП, отм. $-4,000$:
а – вертикальные; *б* – горизонтальные

Среднее значение отпора грунта под подошвой МФП можно найти из отношения вертикальной нагрузки от здания, полученной в статическом расчете, к площади МФП – $\sigma_z = P/S = 178670,7 / (28,23 \cdot 20,6) = 307 \text{ кН/м}^2$. В подстилающем слое МФП залегает ИГЭ-306 – суглинок аллювиальный текучей консистенции с коэффициентом пористости $e_0 = 0,5$ и показателем текучести $I_L = 1$, у которого расчетное сопротивление равно $R = 250 \text{ кН/м}^2$. Так как $\sigma_z = 307 \text{ кН/м}^2 > R = 250 \text{ кН/м}^2$, то в контурной зоне основания МФП должны появиться упругопластические деформации грунта (в пределах глубины, превышающей 5 м, от подошвы фундаментной плиты).

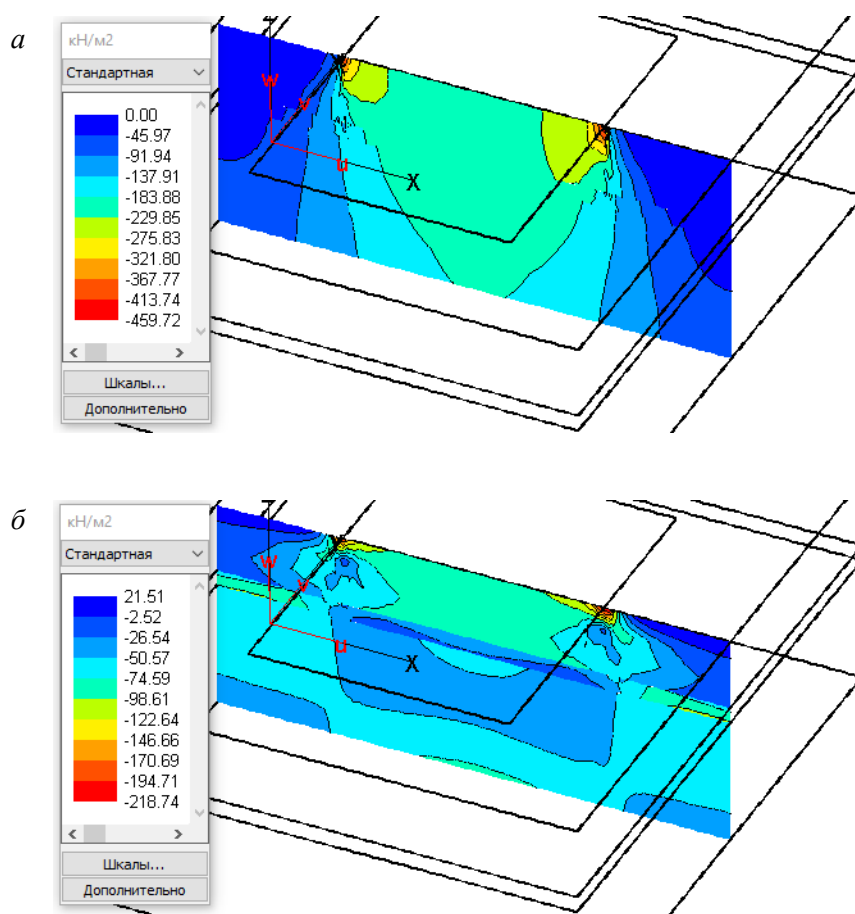


Рис. 4. Изополюсы нормальных напряжений в грунте в расчетной схеме № 1 в вертикальном сечении в плоскости XZ:

а – вертикальные; б – горизонтальные

Расчетная схема № 2. При нелинейном деформировании основания получены следующие значения изополюсов напряжений в грунте по характерным сечениям:

– Горизонтальное сечение на уровне подошвы МФП на отм. –4,000 (рис. 5). Вертикальные сжимающие напряжения за контуром МФП изменяются от $-12,1 \text{ кН/м}^2$ на периферии основания до $-54,9 \text{ кН/м}^2$ в направлении к МФП. Под контурной зоной МФП вертикальные сжимающие напряжения в грунте достигают наибольших значений и находятся в интервале $-354,4 \dots -440,0 \text{ кН/м}^2$. Во внутренней части основания вертикальные сжимающие напряжения незначительно уменьшаются и находятся в диапазоне $-268,9 \dots -354,6 \text{ кН/м}^2$. Горизонтальные напряжения за контуром МФП изменяются от растягивающих значений $7,6 \text{ кН/м}^2$ на периферии основания до сжимающих значений $-74,5 \text{ кН/м}^2$ в направлении к МФП. Под контурной зоной МФП горизонтальные сжимающие напряжения в грунте достигают максимальных значений и изменяются от $-238,8$ до $-403,1 \text{ кН/м}^2$. Во внутренней части основания горизонтальные жи-

мающие напряжения незначительно уменьшаются и находятся в диапазоне $-197,8 \dots -238,8$ кН/м^2 и на 26...37 % меньше соответствующих вертикальных сжимающих напряжений.

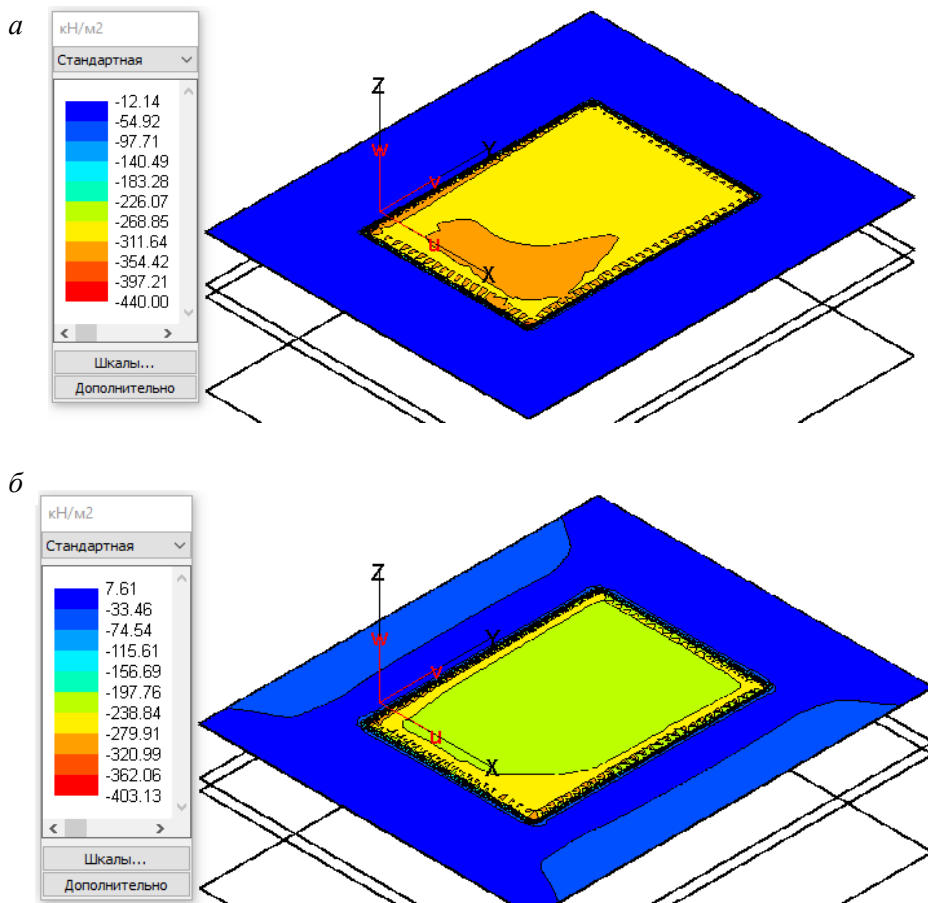


Рис. 5. Изополя нормальных напряжений в грунте в расчетной схеме № 2 на уровне подошвы МФП отм. $-4,000$:
а – вертикальные; б – горизонтальные

– Вертикальное сечение в плоскости XZ (рис. 6). Вертикальные сжимающие напряжения за контуром МФП на отм. $-4,000$ составляют $-17,2 \dots -70,3$ кН/м^2 , на отм. $-20,000$ находятся в диапазоне $-335,2 \dots -388,8$ кН/м^2 . Под контурной зоной МФП вертикальные сжимающие напряжения в грунте на отм. $-4,000$ находятся в интервале $-70,3 \dots -282,7$ кН/м^2 , на отм. $-20,000$ увеличиваются и составляют $-335,7 \dots -495,0$ кН/м^2 . Во внутренней части основания вертикальные сжимающие напряжения на отм. $-4,000$ располагаются в диапазоне $-282,7 \dots -335,7$ кН/м^2 , на отм. $-20,000$ несколько увеличиваются и находятся в интервале $-495,7 \dots -548,1$ кН/м^2 . Горизонтальные напряжения за контуром МФП на отм. $-4,000$ изменяются от растягивающих значений $6,7$ кН/м^2 до сжимающих значений $-68,6$ кН/м^2 , на отм. $-20,000$ возникают только сжима-

ющие горизонтальные напряжения в диапазоне $-219,3 \dots -257,0$ кН/м². Под контурной зоной МФП горизонтальные сжимающие напряжения в грунте на отм. $-4,000$ находятся в интервале $-106,3 \dots -181,6$ кН/м², на отм. $-20,000$ значительно увеличиваются и составляют $-332,3 \dots -370,0$ кН/м². Во внутренней части основания горизонтальные сжимающие напряжения на отм. $-4,000$ изменяются в диапазоне $-181,6 \dots -219,3$ кН/м², на отм. $-20,000$ увеличиваются и находятся в интервале $-332,3 \dots -370,0$ кН/м².

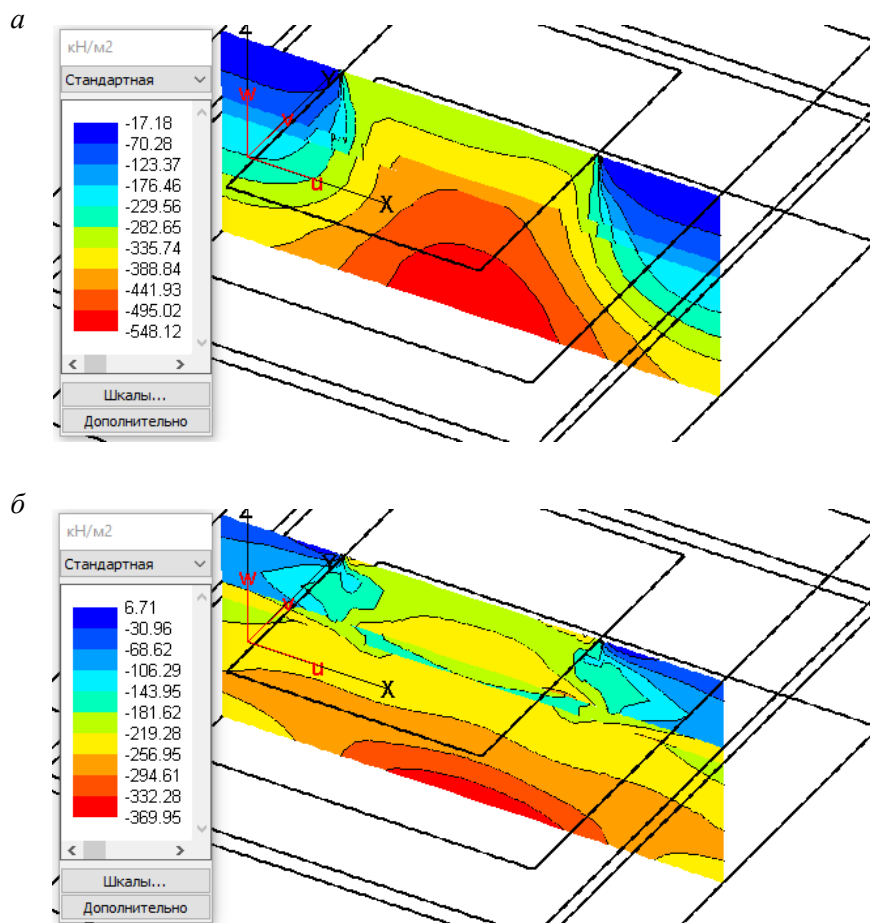


Рис. 6. Изополя нормальных напряжений в грунте в расчетной схеме № 2 в вертикальном сечении в плоскости XZ:
а – вертикальные; б – горизонтальные

Сравнение результатов. Анализ характера распределения нормальных напряжений при моделировании линейно/нелинейно-деформируемого грунта основания в целом показал его качественное совпадение, когда в углах и по краям МФП возникла классическая зона предельного и упругопластического состояния грунта, вследствие характера работы МФП, приближенного к жесткому штампу.

В зоне предельного и упругопластического состояния грунта наибольшие нормальные сжимающие напряжения составили следующие значения:

- при линейной работе грунта: вертикальные напряжения – 699 кН/м^2 ; горизонтальные напряжения – 274 кН/м^2 ;
- при нелинейной работе грунта: вертикальные напряжения – 440 кН/м^2 ; горизонтальные напряжения – 403 кН/м^2 .

Количественное несовпадение характера распределения нормальных напряжений при моделировании линейно/нелинейно-деформируемого грунта в зоне его предельного и упругопластического состояния заключается в следующем:

- при учете нелинейной работы грунта максимальные вертикальные напряжения уменьшились на 33 %, а наибольшие горизонтальные напряжения, наоборот, увеличились на 32 %, т. е. произошло противоположное изменение значений между напряжениями одного направления в пределах $\frac{1}{3}$;
- при учете неупругой работы грунта отношение вертикальных напряжений к горизонтальным уменьшилось с 2,6 до 1,1.

Во внутренней области основания под подошвой МФП величина вертикальных напряжений находится в интервале $210 \dots 280 \text{ кН/м}^2$ в линейно-деформируемом грунте и в пределах $270 \text{--} 355 \text{ кН/м}^2$ в нелинейно-деформируемом грунте. Здесь же значения горизонтальных напряжений находятся в интервале $210 \dots 280 \text{ кН/м}^2$ в линейно-деформируемом грунте и в пределах $270 \text{--} 355 \text{ кН/м}^2$ в нелинейно-деформируемом грунте.

Такой характер перераспределения вертикальных напряжений в грунте объясняется сглаживанием пиковых напряжений грунта в углах и по контуру МФП при переходе работы грунта из упругой стадии в неупругую стадию, и, как следствие, увеличение напряжений во внутренней области основания.

Так как среднее значение отпора грунта под подошвой МФП превышает расчетное сопротивление грунта подстилающего слоя МФП, то учет неупругой модели работы основания становится определяющим.

Деформированное состояние

Расчетная схема № 1. Результаты вертикальных перемещений при линейном деформировании основания на уровне подошвы МФП, отм. $-4,000$ (рис. 7, 8):

- за внешним контуром МФП в грунтовом массиве возникают вертикальные отрицательные перемещения (осадка), которые изменяются от $-0,4$ мм по периферии до $-102,6$ мм в околоконтурной области МФП;
- в центральной части основания под МФП, в так называемой воронке оседания, наибольшие вертикальные перемещения равны $-136,9 \dots -171,0$ мм с уменьшением в направлении контура МФП до значений $-102,7 \dots -136,9$ мм;
- максимальные значения вертикальных перемещений грунтового массива в основании здания с армированной кирпичной кладкой составляют 171 мм и не превышают предельное значение осадок основания для рассматриваемого типа зданий $S_u^{\max} = 180$ мм;

– относительная разность вертикальных перемещений основания составила $(171,0 - 136,9)/0,5 \cdot 28230 = 0,0024$ и равна предельному значению разности осадок $(\Delta/L)_u = 0,0024$.

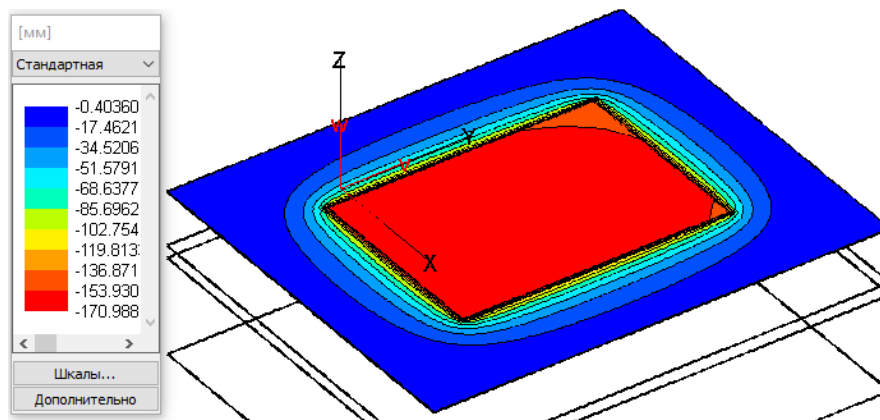


Рис. 7. Изополя вертикальных перемещений в расчетной схеме № 1 на уровне подошвы МФП, отм. –4,000

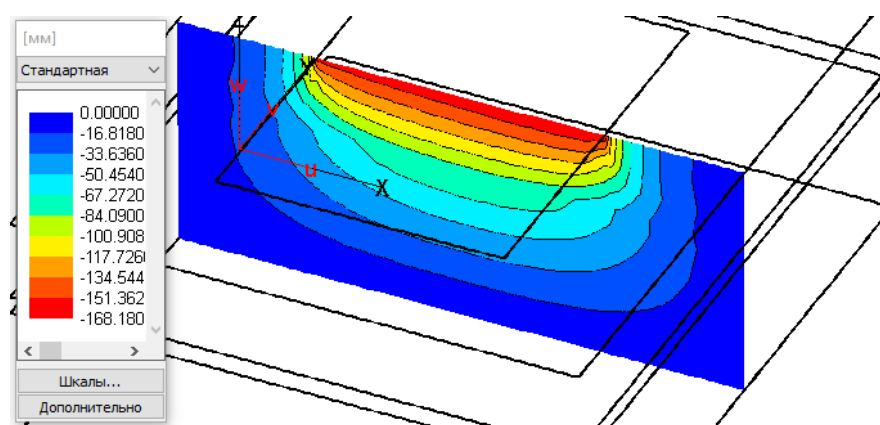


Рис. 8. Изополя вертикальных перемещений в расчетной схеме № 1 в вертикальном сечении в плоскости XZ

Расчетная схема № 2. Результаты вертикальных перемещений при нелинейном деформировании грунтов в основании (рис. 9, 10):

– за внешним контуром МФП на периферии грунтового массива возникают вертикальные положительные перемещения (подъем грунта), равные 58,9 мм, которые в околоконтурной зоне МФП меняют знак (осадка грунта) и достигают –90,2 мм;

– в центральной части основания под МФП, в лунке деформированной зоны, наибольшие вертикальные перемещения равны –338,7...–438,1 мм с уменьшением в контурной зоне МФП до значений –90,2...–338,7 мм;

– максимальные значения вертикальных перемещений грунтового массива в основании здания с армированной кирпичной кладкой составляют 438 мм и в 2,4 раза превышают предельное значение осадок основания для рассматриваемого типа зданий $S_u^{\max} = 180$ мм;

– относительная разность вертикальных перемещений основания составила $(438,1 - 289,0)/0,5 \cdot 28230 = 0,011$ и в 4,6 раза превысила предельно допустимое значение разности осадок $(\Delta/L)_u = 0,0024$.

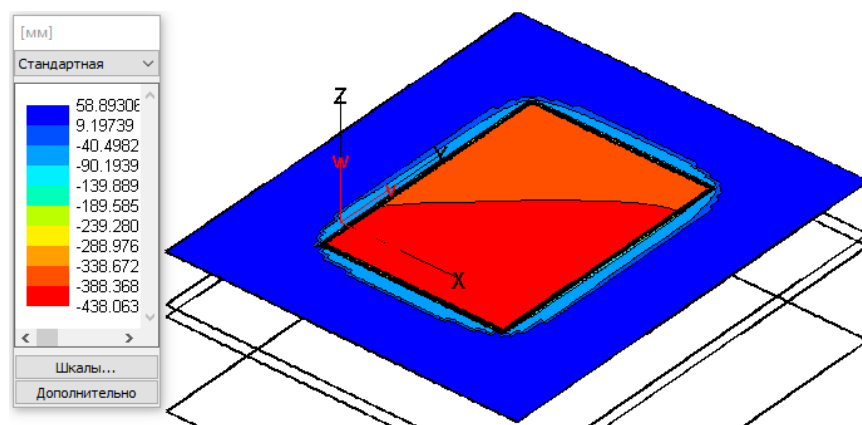


Рис. 9. Изополя вертикальных перемещений в расчетной схеме № 2 на уровне подошвы МФП, отм. –4,000

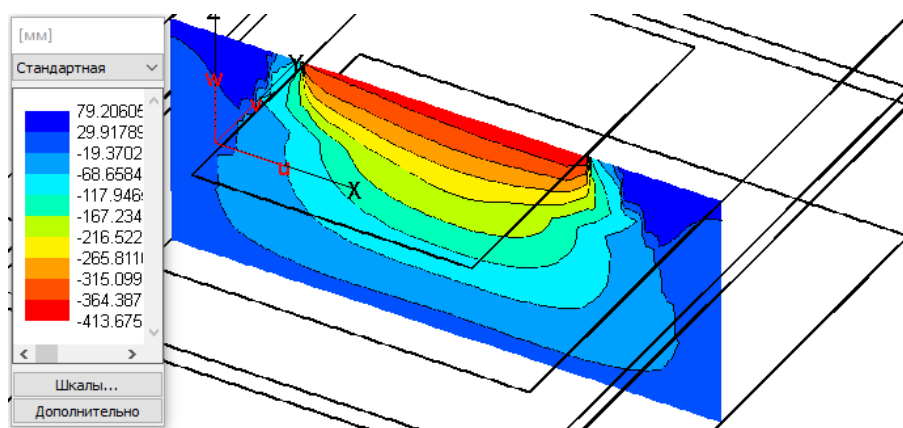


Рис. 10. Изополя вертикальных перемещений в расчетной схеме № 2 в вертикальном сечении в плоскости XZ

Сравнение результатов. Анализ характера распределения вертикальных перемещений основания при моделировании линейно/нелинейно-деформируемого грунта в целом показал его качественное совпадение, когда наибольшие вертикальные перемещения возникают в центральной части грунтового массива под МФП.

Значительные количественные различия появились при учете пластических деформаций грунта, когда максимальные вертикальные перемещения увеличились в 2,4 раза и составили 438 мм, а относительная разность вертикальных перемещений основания увеличилась в 4,6 раза и составила 0,011 по сравнению с линейным деформированием грунта.

Заключение

Развитие неупругих деформаций грунта в основании МФП привело к недопустимым перемещениям плитного фундамента здания. Для недопущения таких перемещений следует исключить появление зоны предельного и упругопластического состояния по контуру МФП, например, устройством по периметру плитного фундамента контурных железобетонных свай [15] либо применением технологии струйной цементации грунта [16].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шашкин К.Г.* Расчет напряженно-деформированного состояния основания фундаментов и здания с учетом их взаимодействия // Реконструкция городов и геотехническое строительство : интернет-журнал. 2001. № 4. С. 6.
2. *Шулятьев О.А.* Основания и фундаменты высотных зданий. Москва, 2016. 392 с.
3. *Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Кузнецов Е.Н.* О современных проблемах расчета высотных зданий из монолитного железобетона // Бетон и железобетон – пути развития : научные труды II Всерос. (Междунар.) конф. В пяти книгах. Т. 1. Пленарные доклады. Москва, 2005. С. 149–166.
4. *Лушников В.В.* Использование мирового опыта при проектировании и строительстве фундаментов высотных зданий с учетом геологических условий Екатеринбурга // Академический вестник УралНИИПроект РААСН. 2009. № 1. С. 76–82.
5. *Алексеев С.И., Камаев В.С.* Учет жесткостных параметров зданий при расчетах оснований и фундаментов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2007. № 3. С. 165–172.
6. *Михайлов В.С., Теплых А.В.* Учет характерных особенностей различных моделей основания при расчете взаимного влияния зданий на больших фундаментных плитах с использованием расчетно-аналитической системы SCAD Office // VI Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений». Владивосток, 2016. С. 133–134.
7. *Шулятьев О.А.* Геотехнические особенности проектирования высотных зданий в Москве // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 10. С. 17–25.
8. *Крыжановский А.Л., Рубцов О.И.* Вопросы надежности проектного решения фундаментных плит высотных зданий // Вестник МГСУ. 2006. № 1. С. 191–198.
9. *Орехов В.В., Зарецкий Ю.К., Кельман М.И.* Расчет взаимодействия плитного фундамента с грунтовым основанием с учетом жесткости верхнего строения // Вестник МГСУ. 2008. № 2. С. 15–17.
10. *Зарецкий Ю.К., Карабаев М.И.* Влияние последовательности возведения близко расположенных высотных зданий на осадки и крен фундаментных плит // Вестник МГСУ. 2006. № 1. С. 50–56.
11. *Шашкин А.Г., Шашкин К.Г.* Расчет фундаментных плит в пространственной постановке с учетом нелинейных деформаций основания // Реконструкция городов и геотехническое строительство : интернет-журнал. 2000. № 3. С. 5.
12. *Кудрявцев С.А., Склярова К.М.* Натурные наблюдения и численное моделирование строительства высотного здания на плитном фундаменте в г. Хабаровске // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 2 (38). С. 86–91.
13. *Ющубе С.В., Подшивалов И.И., Филиппович А.А., Тряпичин А.Е.* Моделирование напряженно-деформированного состояния кирпичного здания повышенной этажно-

- сти на свайном фундаменте // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 4 (69). С. 72–77.
14. Подшивалов И.И., Журавлев А.В. Моделирование кирпичного здания повышенной этажности на свайном фундаменте // Вестник СибАДИ. 2020. 17 (6). С. 754–763.
 15. Hanish J., Katzenbah R., Konig G. Kombinierte Pfahl-Plattengrundungen. Ersnst&Sohn, 2002. 222 p.
 16. Нуждин М.Л., Пономарев А.Б. Расчетное обоснование усиления грунтового основания многоэтажного жилого дома в г. Новосибирске пакетным высоконапорным инъецированием // Проблемы строительного производства и управления недвижимостью : материалы VI Междунар. научно-практ. конф., 24–25 ноября 2020 г. Кемерово : ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», 2020. С. 261–266.

REFERENCES

1. Shashkin K.G. Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya osnovaniya fundamentov i zdaniya s uchetom ikh vzaimodeistviya [Stress-strain state analysis of building foundations with regard to their interaction]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2001. No. 4. P. 6. (rus)
2. Shulyat'ev O.A. Osnovaniya i fundamenty vysotnykh zdaniy [Bases and foundations of high-rise buildings]. Moscow, 2016. 392 p. (rus)
3. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Kuznetsov E.N. O sovremennykh problemakh rascheta vysotnykh zdaniy iz monolitnogo zhelezobetona [Modern problems of structural analysis of high-rise building of insitu reinforced concrete]. In: II Vseros. (Mezhdunar.) konf. "Beton i zhelezobeton – puti razvitiya", v pyati knigakh. (*Proc. 2nd Int. Sci. Conf. 'Concrete and Reinforced Concrete – Glance at Future'*), in 5 vol., Moscow, 2005. V. 1. Pp. 149–166. (rus)
4. Lushnikov V.V. Ispol'zovanie mirovogo opyta pri proektirovani i stroitel'stve fundamentov vysotnykh zdaniy s uchetom geologicheskikh uslovii Ekaterinburga [International experience in foundation design and construction of high-rise buildings with regard to geological conditions of Ekaterinburg]. *Akademicheskii vestnik UralNIIProekt RAASN*. 2009. No. 1. Pp. 76–82. (rus)
5. Alekseev S.I., Kamaev V.S. Uchet zhestkostnykh parametrov zdaniy pri raschetakh osnovanii i fundamentov [Stiffness parameters of buildings in strength analysis of foundations]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2007. No. 3. Pp. 165–172. (rus)
6. Mikhailov V.S., Teplykh A.V. Uchet kharakternykh osobennostei razlichnykh modelei osnovaniya pri raschete vzaimnogo vliyaniya zdaniy na bol'shikh fundamentnykh plitakh s ispol'zovaniem raschetno-analiticheskoi sistemy SCAD Office [Allowing for characteristics of various design models in calculating mutual influence of buildings on pile-raft foundation in SCAD software]. In: VI Mezhdunarodnyi simpozium. Aktual'nye problemy komp'yuternogo modelirovaniya konstruksii i sooruzhenii (*Proc. 6th Int. Sci. Symp. 'Relevant Computer Modeling Problems of Structures'*). Vladivostok, 2016. Pp. 133–134. (rus)
7. Shulyat'ev O.A. Geotekhnicheskie osobennosti proektirovaniya vysotnykh zdaniy v Moskve [Geotechnical design of high-rise buildings in Moscow]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2016. No. 10. Pp. 17–25. (rus)
8. Kryzhanovskii A.L., Rubtsov O.I. Voprosy nadezhnosti proektnogo resheniya fundamentnykh plit vysotnykh zdaniy [Reliability of design solutions for foundation slabs of high-rise buildings]. *Vestnik MGSU*. 2006. No. 1. Pp. 191–198. (rus)
9. Orekhov V.V., Zaretskii Yu.K., Kel'man M.I. Raschet vzaimodeistviya plitnogo fundamenta s gruntovym osnovaniem s uchetom zhestkosti verkhnego stroeniya [Analysis of interaction between concrete and soil foundations with regard to superstructure stiffness]. *Vestnik MGSU*. 2008. No. 2. Pp. 15–17. (rus)
10. Zaretskii Yu.K., Karabaev M.I. Vliyanie posledovatel'nosti vozvedeniya blizko raspolozhennykh vysotnykh zdaniy na osadki i kren fundamentnykh plit [Influence of the sequential arrangement of closely spaced high-rise buildings on slab settlement and roll]. *Vestnik MGSU*. 2006. No. 1. Pp. 50–56. (rus)
11. Shashkin A.G., Shashkin K.G. Raschet fundamentnykh plit v prostranstvennoi postanovke s uchetom nelineynykh deformatsii osnovaniya [Concrete foundation analysis in spatial formu-

- lation with regard to nonlinear foundation deformations]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2000. No. 3. P. 5. (rus)
12. Kudryavtsev S.A., Sklyarova K.M. Naturnye nablyudeniya i chislennoe modelirovanie stroitel'stva vysotnogo zdaniya na plitnom fundamente v g. Khabarovske [Field observations and numerical simulation of high-rise building construction on concrete foundation in Khabarovsk]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie*. 2013. No. 2 (38). Pp. 86–91. (rus)
 13. Yushchube S.V., Podshivalov I.I., Filippovich A.A., Tryapitsin A.E. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kirpichnogo zdaniya povyshennoi etazhnosti na svainom fundamente [Stress-strain state modeling of high-rise brick building on pile foundation]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2018. No. 4 (69). Pp. 72–77. (rus)
 14. Podshivalov I.I., Zhuravlev A.V. Modelirovanie kirpichnogo zdaniya povyshennoi etazhnosti na svainom fundamente [Modeling of high-rise brick building on pile foundation]. *Vestnik SibADI*. 2020. No. 17 (6). Pp. 754–763. (rus)
 15. Hanisch J., Katzenbach R., König G. Kombinierte Pfahl-Plattengründung. Berlin: Ernst und Sohn, 2002. 222 p.
 16. Nuzhdin M.L., Ponomarev A.B. Raschetnoe obosnovanie usileniya gruntovogo osnovaniya mnogoetazhnogo zhilogo doma v g. Novosibirsk paketnym vysokonapornym in'etsirovaniem [Soil foundation reinforcement analysis of a multi-storey building in Novosibirsk using high-pressure soil injection]. In: Problemy stroitel'nogo proizvodstva i upravleniya nedvizhimost'yu: Materialy VI Mezhdunar. nauchno-prakt. konf. (*Proc. Int. Sci. Conf. 'Problems of Construction Operations and Real Estate Management'*). Kemerovo, 2020. Pp. 261–266. (rus)

Сведения об авторах

Ющубе Сергей Васильевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sv@tsuab.ru

Подшивалов Иван Иванович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ivanpodchivalov@list.ru

Authors Details

Sergei V. Yushchube, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; sv@tsuab.ru

Ivan I. Podshivalov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; ivanpodchivalov@list.ru

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

УДК 622.692.4.074.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-133-145

*В.И. ХИЖНЯКОВ, А.В. НЕГОДИН, Р.Ю. БАКШАНСКИЙ,
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

О ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РЕЧНЫХ ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Рассмотрены условия динамической устойчивости подводных переходов магистральных трубопроводов при наличии оголений и провисов в зависимости от жесткости трубы и скорости речного потока. Рассчитаны частоты гидродинамической силы и собственных колебаний трубопровода при фактической и критической длине провиса трубопровода.

Установлено, что частота внешней гидродинамической силы, действующей на трубопровод в условиях, когда длина провиса соответствует критической, совпадает с частотой собственных колебаний.

Показано, что потеря устойчивости подводных переходов происходит в резонансной области колебания трубопровода за счет усиливающего действия переменной гидродинамической силы.

Ключевые слова: динамическая устойчивость; магистральные трубопроводы; подводные переходы; гидродинамическая сила; продольная сила; момент инерции; жесткость трубы; частота колебаний; гофры; вмятины; трещины.

Для цитирования: Хижняков В.И., Негодин А.В., Бакшанский Р.Ю. О динамической устойчивости речных подводных переходов магистральных трубопроводов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 133–145.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-133-145

*V.I. KHIZHNYAKOV, A.V. NEGODIN, R.Yu. BAKSHANSKIY,
Tomsk State University of Architecture and Building*

DYNAMIC STABILITY OF SUBMERGED PIPELINES

The paper considers the dynamic stability of submerged pipelines with denudation and sagging depending on their stiffness and the river flow rate. The hydrodynamic force frequency

and natural vibrations of the pipeline are calculated at the actual and critical length of the pipeline sagging.

It is shown that the frequency of the external hydrodynamic force applied to the sagged pipeline with the length corresponding to the critical, coincides with the frequency of natural vibrations.

It is found that the loss of stability of submerged pipelines occurs in the resonant region of the pipeline vibration due to the increased variable hydrodynamic force.

Keywords: dynamic stability; submerged pipelines; hydrodynamic force; longitudinal force; inertia moment; pipe stiffness; vibration frequency; corrugations; dents; cracks.

For citation: Khizhnyakov V.I., Negodin A.V., Bakshanskiy R.Yu. Dinamicheskaya ustoichivost' rechnykh podvodnykh perekhodov magistral'nykh truboprovodov [Dynamic stability of submerged pipelines]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 2. Pp. 133–145.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-133-145

Динамическая устойчивость речных подводных переходов магистральных трубопроводов при наличии оголений и провисов определяется двумя видами сил: внешними, вызванными потоком воды, обтекающей трубу (воздействие лобового сопротивления и подъемной силы), и внутренними – пульсацией рабочего давления в трубе, которые зависят от упругости, инерции и сопротивления (демпфирования) трубопровода. До настоящего времени вопрос о динамической устойчивости подводных переходов магистральных трубопроводов, подверженных одновременно двум переменным внешним и внутренним нагрузкам, остается открытым. Внутренние силы обуславливают собственные продольные и поперечные колебания трубопровода (при нулевой внешней нагрузке). Сила упругости $P_{упр}$ возникает при отклонении трубопровода от положения равновесия и стремится вернуть трубопровод в первоначальное положение. $P_{упр}$ прямо пропорциональна прогибу трубопровода $y_{пр}$ и кольцевой жесткости трубы S_r :

$$P_{упр} = S_r y_{пр}, \quad S_r = \frac{EI}{D_n^3}, \quad \text{где } E - \text{модуль упругости трубной стали; } I - \text{момент}$$

инерции сечения трубы, $I = \frac{\pi(D_n^4 - D_{вн}^4)}{64}$; D_n – наружный диаметр трубопровода;

$D_{вн}$ – внутренний диаметр.

Кольцевая жесткость трубопровода, определяемая частотой собственных колебаний, зависит от диаметра и момента инерции сечения (толщины стенки трубы). В табл. 1 представлена зависимость кольцевой жесткости трубы от диаметра и толщины стенки.

При натекании потока воды трубопровод находится под воздействием внешней поперечной гидродинамической силы: $P_n = CD_n l \cdot \rho_v \frac{v^2}{2}$ [1], действующей как в направлении потока (горизонтальная составляющая) P_n^r , так и в вертикальном направлении P_n^B , под воздействием которой трубопровод

подвергается вынужденным колебаниям, частота которых зависит от частоты срыва вихрей и определяется числом Струхала (рис. 1).

Таблица 1

Зависимость кольцевой жесткости трубопровода S_r от его диаметра и толщины стенки трубы

Наружный диаметр трубопровода, мм	Кольцевая жесткость трубопровода S_r , МН/м, при номинальной толщине стенки трубы, мм								
	6	8	10	12	14	16	18	20	21
426	455	600	744	884	1014	1144	–	–	–
530	502	610	757	891	1031	1165	1296	1427	1488
720	–	622	770	918	1061	1203	1341	1478	1546
1020	–	–	780	931	1079	1227	1356	1516	1586
1220	–	–	784	937	1087	1236	1384	1530	1603
1420	–	–	–	–	1092	1243	1393	1541	1615

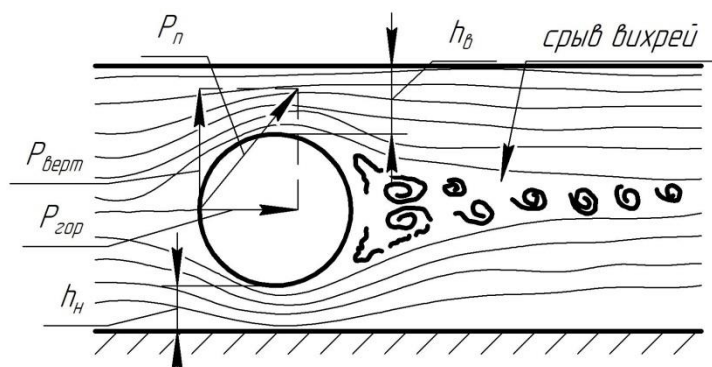


Рис. 1. Схема возникновения горизонтальной $P_n^Г$ и вертикальной $P_n^В$ составляющих гидродинамической силы P_n при поперечном обтекании трубопровода потоком воды

При срыве вихрей с поверхности трубы происходит мгновенное изменение давления на ее поверхности, что дает толчок, выводящий трубу из статического равновесия. Суммарное действие таких толчков является причиной возникновения переменной гидродинамической силы P_n , под воздействием которой трубопровод на участке провиса входит в режим колебаний.

Скорость потока воды на двухниточном переходе магистрального нефтепровода на р. Оби (у г. Томска) диаметром 1020 мм на различных участках русла изменяется в пределах $v = 0,6-1,2$ м/с. При обтекании трубопровода потоком воды скорость потока у верхней образующей трубы возрастает (сгущаются силовые линии, рис. 1), соответственно снижается давление (уравнение Бернулли), возникает подъемная сила $P_n^В$, под воздействием которой трубопровод перемещается в вертикальном направлении до тех пор, пока не наступит равновесие. После этого трубопровод под влиянием восстанавливающей силы (упругости

трубопровода) начинает двигаться вниз. В отсутствии рассеяния энергии амплитуда колебаний u увеличивалась бы до бесконечности. Энергия рассеяния идет на вихреобразование и преодоление трения. В реальных условиях потеря энергии становится равной подводимой потоком воды энергии. После этого колебания трубопровода происходят с постоянной амплитудой и частотой – возникают автоколебания провисающих участков. Частота срыва вихрей зависит от скорости потока v и диаметра трубопровода D_n : $\lambda = \frac{0,2v}{D_n} = \frac{0,2 \cdot 0,8}{1,02} = 0,16$ Гц, что соот-

ветствует круговой частоте, равной $\omega_{\text{вих}} = 2\pi\lambda = 1,0$ Гц.

Горизонтальная составляющая поперечной гидродинамической силы (сила лобового сопротивления, рис. 1) определяется выражением $P_{\Pi}^r = C_r D_n l \rho_v \frac{v^2}{2}$,

вертикальная подъемная сила: $P_{\Pi}^b = C_{\text{верт}} D_n l \rho_v \frac{v^2}{2}$, где C_r, C_b – соответственно коэффициент лобового сопротивления и коэффициент подъемной силы; D_n – наружный диаметр зафутерованного трубопровода с пригрузами; l – длина провиса трубопровода, рис. 2; ρ_v – плотность воды; v – скорость потока воды.

Сила инерции, возникающая под воздействием внешней силы, определяется массой трубопровода на участке оголения (провиса) $m_{\text{тр}}$ и ускорением a , действующим на эту массу при колебаниях: $P_{\text{ин}} = ma$. Сила инерции $P_{\text{ин}}$, помимо массы трубопровода, определяется еще так называемой присоединенной массой воды $m_{\text{вод}}$. Присоединенную массу воды $m_{\text{вод}}$ для колеблющегося трубопровода в толще воды рассчитывают по формуле $m_{\text{вод}} = 0,375 \rho_{\text{вод}} \pi D_n^2$. Для практических расчетов присоединенную массу воды $m_{\text{вод}}$ принимают равной 1,5 массы вытесненной трубопроводом воды, что соответствует приведенной формуле. Следует отметить, что присоединенная масса воды также зависит и от частоты колебаний трубопровода – чем выше частота колебаний, тем меньше $m_{\text{вод}}$. При низкочастотной пульсации трубопровода этот фактор не учитывают.

Общая масса единицы длины трубы с учетом присоединенной массы воды равна сумме: $m = m_{\text{тр}} + m_{\text{вод}} = 0,1q_{\text{тр}}^{\text{пр}} + 0,375 \rho_{\text{вод}} \pi D_n^2$, где приведенная нагрузка от собственного веса трубопровода $q_{\text{тр}}^{\text{пр}} = q_{\text{тр}} + 0,11q_{\text{тр}} = 3623 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$, где $q_{\text{тр}}$ – вес погонного метра трубы:

$$q_{\text{тр}} = \rho_{\text{ст}} g \pi D_n \delta = 7850 \cdot 9,8 \cdot 3,14 \cdot 1,02 \cdot 0,014 = 3449,5 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Здесь $\rho_{\text{ст}}$ – плотность трубной стали; g – ускорение свободного падения; $\delta_{\text{тр}}$ – толщина стенки трубы.

$$m = m_{\text{тр}} + m_{\text{вод}} = 0,1q_{\text{тр}}^{\text{пр}} + 0,375\rho_{\text{вод}}\pi D_{\text{н}}^2 =$$

$$= 0,1 \cdot 362,3 + 0,375 \cdot 1000 \cdot 3,14(1,02)^2 = 1588,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}}.$$

Значения коэффициента подъемной силы C_b у колеблющегося трубопровода, по опубликованным данным, изменяется в пределах $C_b = 0,2-1,5$. Коэффициент подъемной силы C_b зависит как от глубины укладки трубопровода h_b (расстояния от поверхности воды до верхней образующей трубопровода), так и от расстояния от дна реки до нижней образующей трубопровода на участке провиса h_n (см. рис. 1) и имеет максимальное значение, когда $h_n = 0$ и давление у нижней образующей трубопровода равно гидростатическому. Коэффициент подъемной силы C_b зависит от частоты срыва вихрей λ . В нашем случае при круговой частоте, равной: $\omega_{\text{вих}} = 1,0$ Гц, коэффициент подъемной силы при низкочастотной пульсации принимают примерно равным: $C_b = 0,2$. При $h_n / D_n \geq 0,1$ вертикальная составляющая гидродинамического сопротивления практически исчезает, $C_b = 0$, и трубопровод рассчитывают только на лобовое сопротивление при $C_r = 1,1$.

В общем случае процесс пульсации поперечной гидродинамической силы при обтекании трубопровода водой на участках провиса (рис. 2) носит случайный характер. Пульсирующая гидродинамическая сила автоматически резонирует с собственной частотой трубопровода. При этом возрастание амплитуды собственных колебаний трубопровода будет продолжаться до тех пор, пока энергия потока воды будет превышать работу, совершаемую демпфирующими силами. Колебания могут происходить как в горизонтальной плоскости, так и в вертикальной с частотой, определяемой числом Струхала.

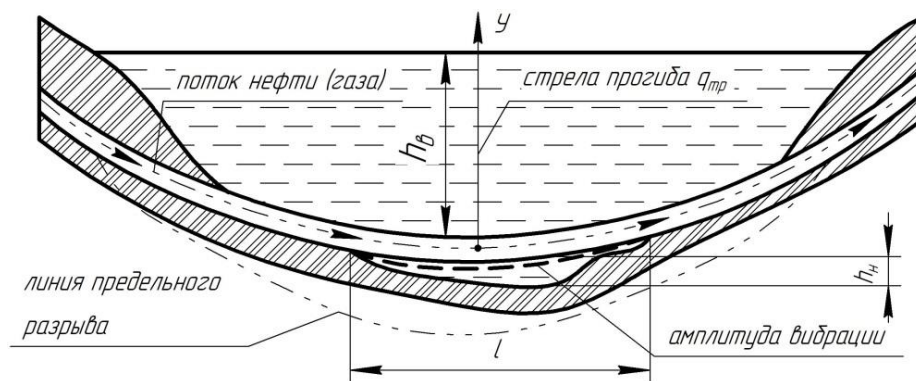


Рис. 2. Схема поперечных колебаний подводного перехода магистрального трубопровода на участках провиса, вызванных внешними и внутренними силами

При расчете принимают, что воздействие гидродинамической нагрузки на обтекаемый трубопровод происходит по гармоническому закону: $P_{\Pi} = P_0 \sin \omega_p t$,

где P_0 – интенсивность поперечной гидродинамической силы; ω_p – круговая частота поперечной силы: $\omega_p = \frac{2\pi v Sh}{D_n} = \frac{6,28 \cdot 0,8 \cdot 0,2}{1,02} = 1,0$ Гц, где $Sh = 0,2$ – число

Струхала. То есть круговая частота срыва вихрей совпадает с круговой частотой поперечной составляющей гидродинамической силы: $\omega_{вих} = \omega_p$.

На рис. 2 показаны оголения и провисы на подводных переходах, которые образуются под воздействием гидродинамического потока воды, когда трубопровод уложен выше линии предельного размыва, при переформировании русла и берегов реки. На участках провиса трубопровод искривляется как балка на двух опорах, находящаяся под воздействием распределенной радиальной гидродинамической силы, изменяющейся во времени: $P_n = P_0 \sin \omega_p t$. Для рассматриваемого случая дифференциальное уравнение изгибных колебаний провисающего участка трубопровода имеет следующий вид [1]:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + m \frac{d^2 y}{dx^2} + \beta \frac{dy}{dt} + Ky = P_0 \sin \omega_p t, \quad (1)$$

где x и y – координаты провисающего участка трубопровода; EI – изгибная жесткость трубы; m – масса единицы длины трубы с учетом присоединенной массы воды; β – коэффициент сопротивления колебаниям: $\beta = 0,3D_n$; K – коэффициент грунтовой постели: $K = k_0 D_n$, где k_0 – коэффициент упругого отпора основания. Для песчаного грунта $k_0 = 1-1,5$ Н/м³. Для участков провиса, когда трубопровод на грунт не опирается, $k_0 = 0$.

Интегрирование уравнения (1) позволяет получить уравнение упругих изгибных колебаний провисающего участка трубопровода (без учета продольного усилия) в виде суммы независимых синусоид [1, 2]:

$$y = \sum_{n=1}^{\infty} a_n x_n \sin(\omega_{np} t - \varphi_n), \quad (2)$$

где коэффициенты a_n , x_n и φ_n находятся из граничных условий, которые определяются характером связи трубопровода с грунтом на концах провисающего участка протяженностью l . При $x=0$ и $x=l$ $y(x) = \frac{dy}{dx} = 0$, решение уравнения (2) принимает вид

$$y = a_0 x_1 \sin(\omega_{np} t - \varphi_1), \quad (3)$$

где a_0 – амплитуда колебаний; φ_1 – фазовый угол, позволяющий определить отклонение трубопровода в нулевой момент времени, при $t=0$; ω_{np} – собственная частота поперечных колебаний трубопровода.

Полученное решение (3) для рассматриваемого случая необходимо интерпретировать как результат сложения двух видов колебаний трубопровода под воздействием горизонтальной P_n^r и вертикальной P_n^b составляющих гидродинамической силы P_n при поперечном обтекании трубопровода потоком

воды (см. рис. 1). Колебания трубопровода в вертикальной и горизонтальной плоскостях имеют одинаковую частоту $\omega_{\text{тр}}$, но различные амплитуды колебаний a_0 и различные фазовые углы φ_1 . Результат сложения двух колебаний одинаковой частоты является колебанием той же частоты, но с измененными величинами амплитуды и фазы. Собственная частота колебаний трубопровода зависит от условий закрепления трубопровода на концах провисающего участка, для жесткого закрепления $\omega_{\text{тр}} = \frac{4,73^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$ [3, 4].

При расчете подводного трубопровода на динамические воздействия необходимо знать его собственную частоту и частоту колебаний внешней гидродинамической силы. При колебаниях подводных трубопроводов могут устанавливаться различные граничные условия в зависимости от положения трубопровода относительно дна: на дне (при $h_n = 0$), вблизи дна, когда $h_n / D_n < 0,1$, и в толще воды, когда $h_n / D_n \geq 0,1$. При расчете параметров колебаний подводных трубопроводов принято условие, когда провисающий трубопровод находится вблизи дна, при $h_n / D_n < 0,1$.

В табл. 2 представлены расчетные значения параметров колебаний подводных переходов магистральных трубопроводов диаметром $D_n = 426\text{--}1420$ мм с толщиной стенки трубы $\delta_{\text{тр}} = 14$ мм под действием поперечной гидродинамической силы P_n . Длина провиса участка подводного трубопровода принята реальной, равной $l = 26$ м, скорость потока, действующего на трубопровод, $v = 0,8$ м/с.

Таблица 2

Расчетные значения параметров колебаний подводных переходов магистральных трубопроводов диаметром $D_n = 426\text{--}1420$ мм с толщиной стенки трубы 16 мм под действием гидродинамической силы P_n

Параметры трубопровода	Расчетные значения					
Наружный диаметр трубы D_n , мм	426	530	720	1020	1220	1420
Толщина стенки трубы $\delta_{\text{тр}}$, мм	14	14	14	14	14	14
Момент инерции сечения трубы I , м ⁴	0,00039	0,00077	0,00198	0,00557	0,00988	0,01568
Масса 1 м зафутерованной трубы $m_{\text{тр}}$, кг/м	184,01	229,02	311,95	442,24	529,14	616,02
Присоединенная масса воды $m_{\text{вод}}$, кг/м	213,71	330,76	610,46	1225,07	1752,59	2374,31
Интенсивность подъемной силы P_0 , Н/м	27,26	33,92	46,1	65,28	78,1	90,88

Окончание табл. 2

Параметры трубопровода	Расчетные значения					
Интенсивность силы лобового сопротивления P_0^* , Н/м	149,95	186,56	253,44	359,04	429,44	499,84
Круговая частота поперечной гидродинамической силы ω_p , Гц	3,35	1,89	1,4	0,98	0,82	0,7
Собственная частота колебаний трубопровода $\omega_{тр}$, Гц	0,005	0,06	0,08	0,131	0,178	0,216

Результаты расчета свидетельствуют о том, что на участках провиса длиной $l = 26$ м при скорости потока $v = 0,8$ м/с поперечная гидравлическая сила действует не в такт со свободными колебаниями трубопровода. Расчетные значения круговой частоты колебаний гидродинамической силы практически на порядок превосходят значения собственной частоты колебаний трубопровода, что исключает резонансное возрастание амплитуды вынужденных колебаний трубопроводов на участках провиса при рассматриваемых условиях. При постоянной длине провиса собственная частота колебаний трубопроводов возрастает по мере увеличения диаметра трубы. Сопоставление результатов, приведенных в табл. 2, с жесткостью трубопроводов, приведенной в табл. 1, свидетельствует о том, что расчетные значения параметров колебания подводных трубопроводов без учета продольного усилия имеют значительный запас устойчивости даже на участках провиса, когда коэффициент упругого отпора основания $k_0 = 0$. Однако, как показывает опыт эксплуатации подводных трубопроводов, имеются случаи, когда труба теряет устойчивость с образованием локальных вмятин и гофр у верхней образующей трубопровода (в сжатой области) и трещин у нижней образующей (в растянутой области), что, по-видимому, связано с недоучетом искривления трубы на участке провиса. На рис. 2 показан провис на искривленном участке подводного перехода. Искривленные участки трубопроводов на подводных переходах, по сравнению с прямолинейными, имеют меньший уровень продольной устойчивости, поэтому именно они представляют наибольшую опасность.

Поперечное перемещение искривленного участка определяется продольным перемещением труб, прилегающих береговых участков под воздействием продольной силы. Эквивалентное продольное усилие $P_{пр}$, т. е. усилие, которое реализуется в продольном перемещении трубопровода, находим по выражению

$$P_{пр} = \alpha_t EF \Delta t + 0,2 \sigma_{кц} F. \quad (4)$$

Для рассматриваемого подводного перехода с наружным диаметром $D_n = 1020$ мм, толщиной стенки трубы $\delta = 14$ мм площадь поперечного сече-

ния стенки трубы $F = 0,045 \text{ м}^2$. Для рабочего давления $P_{\text{раб}} = 3,5 \text{ МПа}$ величина кольцевых напряжений $\sigma_{\text{кц}} = P_{\text{раб}} D_{\text{вс}} / 2\delta = 3,5 \cdot 0,992 / 0,028 = 124 \text{ МПа}$. Принимая, что $\alpha_t = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, а $\Delta t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ (для центральной части Западной Сибири):

$$P_{\text{пр}} = \alpha_t E F \Delta t + 0,2 \sigma_{\text{кц}} F = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 2,01 \cdot 10^{11} \cdot 0,045 \cdot 60 + 0,2 \cdot 124 \cdot 10^6 \cdot 0,045 = 7,63 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Под воздействием продольной силы $P_{\text{пр}}$ искривленный участок подводного перехода не будет равномерно перемещаться в поперечном направлении по всей длине перехода. Максимальный изгиб будет наблюдаться на участке провиса. При этом критическая продольная (сжимающая) сила, при которой криволинейный участок провисающего трубопровода теряет устойчивость, составит [5]

$$P_{\text{кр}} = \beta^3 \sqrt{q_{\text{в}}^2 EI},$$

где β – коэффициент, зависящий от

$$\theta = \frac{1}{\rho^3 \sqrt{\frac{q_{\text{в}}}{EI}}} = \frac{1}{1000^3 \sqrt{\frac{146435,3}{2,01 \cdot 10^{11} \cdot 5,57 \cdot 10^{-3}}}} = 0,01$$

и

$$Z = \frac{\sqrt{\frac{p_0 F}{q_{\text{в}} I}}}{\sqrt[3]{\frac{q_{\text{в}}}{EI}}} = \frac{\sqrt{\frac{34960,27 \cdot 0,045}{146435,3 \cdot 5,57 \cdot 10^{-3}}}}{\sqrt[3]{\frac{146435,3}{2,01 \cdot 10^{11} \cdot 5,57 \cdot 10^{-3}}}} = 138,7.$$

На основе рассчитанных значений θ и Z по диаграмме, приведенной в работе [5], коэффициент $\beta = 25$.

$\rho = 1000 \text{ м}$ – радиус упругого изгиба трубопровода; p_0 – сопротивление грунта продольным перемещениям трубопровода единичной длины:

$$p_0 = \pi D_{\text{н}} \tau_{\text{пр}} = 3,14 \cdot 1,02 \cdot 10912,4 = 34950,27 \frac{\text{Н}}{\text{м}};$$

$$\tau_{\text{пр}} = p_{\text{гр}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{гр}} + c_{\text{гр}} = 13937 \operatorname{tg} 36^\circ + 0 = 10912,4 \text{ Па.}$$

Сопротивление вертикальным перемещениям провисающего участка трубы, отнесенное к единице длины провиса $l_{\text{пр}}$, равно

$$q_{\text{в}} = q_{\text{гр}}^{\text{пр}} + n_{\text{гр}} p_{\text{гр}} D_{\text{н}} \left(h_0 + \frac{D_{\text{н}}}{2} - \frac{\pi D_{\text{н}}}{8} \right) = 3823 + 0,8 \cdot 13937 \cdot 1,02 \left(11,5 + \frac{1,02}{2} + \frac{3,14 \cdot 1,02}{8} \right) = 146435,3 \frac{\text{Н}}{\text{м}};$$

коэффициент надежности по нагрузке $n_{\text{гр}} = 0,8$; среднее удельное давление на трубопровод

$$P_{\text{тр}} = \frac{2n_{\text{тр}}\rho_{\text{тр}}D_{\text{н}} \left[\left(h_0 + \frac{D_{\text{н}}}{8} \right) + \left(h_0 + \frac{D_{\text{н}}}{2} \right) \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_{\text{тр}}}{2} \right) \right] + q_{\text{тр}}}{\pi D_{\text{н}}} = 13937 \text{ Па};$$

высота толщ воды над трубопроводом $h_0 = 10,5$ м.

Осевой момент инерции поперечного сечения трубы

$$I = \frac{\pi(D_{\text{н}}^4 - D_{\text{вн}}^4)}{64} = \frac{3,14(1,02^4 - 0,992^4)}{64} = 5,57 \cdot 10^{-3} \text{ м}^4;$$

$$P_{\text{кр}} = \beta^3 \sqrt[3]{q_{\text{в}}^2 EI} = 25^3 \sqrt[3]{(146435,3)^2 2,01 \cdot 10^{11} \cdot 5,57 \cdot 10^{-3}} = 33047900 \text{ Н}.$$

Условие продольной устойчивости трубопровода выполняется, $P_{\text{пр}} = 7,63 \cdot 10^6 < P_{\text{кр}} = 3,3 \cdot 10^7$, что исключает возможность потери устойчивости искривленного участка подводного перехода трубопровода.

В табл. 3 представлена зависимость частоты собственных колебаний трубопровода диаметром 1020 мм $\omega_{\text{тр}}$ с толщиной стенки трубы 14 мм от длины провиса $l_{\text{пр}}$.

Таблица 3

Зависимость собственной частоты колебаний трубопровода $D_{\text{н}} = 1020$ мм от длины провиса $l_{\text{пр}}$

Длина провиса трубопровода, $D_{\text{н}} = 1020$ мм, $l_{\text{пр}}$, м	15	30	45	80	100	150
Собственная частота колебаний трубопровода, $D_{\text{н}} = 1020$ мм, $\omega_{\text{тр}}$, Гц	13,3	3,2	1,5	0,5	0,3	0,13

Анализ результатов, приведенных в табл. 3, свидетельствует о том, что на собственную частоту колебаний трубопровода существенное влияние оказывает длина провисающего участка $l_{\text{пр}}$. При изменении длины провиса от 15 до 150 м собственная частота колебаний трубопровода $D_{\text{н}} = 1020$ мм меняется от 13,3 до 0,13 Гц, уменьшается в 100 раз. В связи с этим представляет интерес, при какой критической длине провиса $l_{\text{кр}}$ частота собственных колебаний $\omega_{\text{тр}}$, зависящая от жесткости трубы EI , совпадет с частотой вынужденных колебаний $\omega_{\text{тр}}$, определяемой скоростью течения реки v .

Приравняв $\omega_{\text{тр}} = \omega_P$, получим

$$l_{\text{кр}} = 4,73 \sqrt{\frac{D_{\text{н}}}{2\pi v Sh}} \sqrt{\frac{EI}{m}} = 4,73 \sqrt{\frac{1,02}{6,28 \cdot 0,8 \cdot 0,2}} \sqrt{\frac{2,01 \cdot 10^{11} \cdot 5,57 \cdot 10^{-3}}{1588,3}} = 137 \text{ м}.$$

На практике потеря устойчивости трубопровода $D_{\text{н}} = 1020$ мм с толщиной стенки 14 мм, по-видимому, связана с тем, что на концах провисающего

участка длиной 26 м подводный переход трубопровода общей протяженностью 700 м не был жестко закреплен и реальная длина провиса не соответствовала длине оголения трубы. Грунтовая засыпка на концах провисающего участка характеризуется податливостью, допускающей вибрацию трубопровода. В связи с этим для рассматриваемых условий допустимо существование некоторой эффективной (критической) длины провисающего участка $l_{кр} = 137$ м, при которой возникает резонанс вибрации, т. е. жесткое закрепление концов провисающего участка было обеспечено не при реальной длине провиса 26 м, а при его эффективной длине.

С другой стороны, собственная частота вибрации провисающего участка трубопровода $\omega_{тр}$ при опорных закреплениях зависит от стрелы прогиба трубопровода $y_{пр}$ и может быть определена по формуле [6]:

$$\omega_{тр} = \sqrt{\frac{g}{y_{пр}}}, \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения. Приведенная формула справедлива в широких пределах, в том числе, по нашему мнению, и для вынужденных колебаний провисающих участков подводных переходов магистральных трубопроводов при жестких опорных закреплениях. В рассматриваемых условиях провис на подводном переходе обнаружен у левого (крутого) берега. Разница высотных отметок дна береговой траншеи и нижней образующей провисающего участка трубопровода составляла 10 м. Отметим, что при $y_{пр} = 10$ м, в соответствии с формулой (5), собственная частота колебаний трубопровода $\omega_{тр}$ будет равна $\omega_{тр} = 0,99$ Гц. Частота внешней гидродинамической силы, действующей на трубопровод, $\omega_p = 0,98$ Гц (см. табл. 2), т. е. частоты собственных и вынужденных колебаний провисающего участка трубопровода практически совпадают: $\frac{\omega_{тр}}{\omega_p} = 1,01$ – возникает резонанс. В резонансной обла-

сти колебания трубопровода усиливаются за счет переменной гидродинамической силы $P_{п}$. При этом амплитуды колебаний, а следовательно, и динамические напряжения в стенке трубы кратно возрастают, что приводит к потере устойчивости подводного перехода с образованием локальных вмятин, гофр и трещин. Потеря устойчивости провисающего участка в условиях вибрации происходит из-за упругодеформированного состояния трубопровода [7], в том числе и за счет усталостных трещин, накапливающихся в стенке трубы в процессе вибрации трубопровода. Наличие усталостных трещин снижает жесткость трубопровода и, следовательно, изменяет частоту собственных колебаний трубопровода. У внешней поверхности трубопровода резонансные напряжения достигают максимальных значений, что способствует наступлению критического состояния равновесия, когда на верхней (сжатой) области трубы образуются локальные вмятины (гофры), а в нижней части (растянутой области) – трещины, преимущественно в области кольцевых сварных швов (рис. 3).

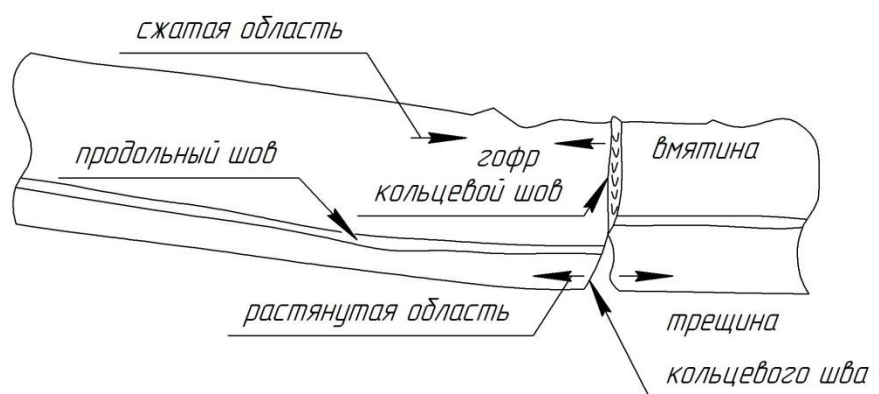


Рис. 3. Схема потери устойчивости провисающего участка резервной нитки подводного перехода магистрального нефтепровода Ду 1020 мм на р. Оби с образованием гофра (сверху) и трещины (снизу) в области кольцевого сварного шва

Потеря устойчивости подводных переходов на участках провиса сопровождается последующей разгерметизацией полости подводного трубопровода с потерей транспортируемого продукта (нефти или газа). Это одна из основных причин инцидентов, аварий и даже катастроф, провоцирующих серьезные экологические катаклизмы на подводных переходах магистральных трубопроводов. С целью исключения этих негативных последствий, при обнаружении провисов на подводных переходах магистральных трубопроводов, необходимо принимать неотложные меры к их ликвидации путем подсадки подводного перехода ниже линии предельного размыва, исключающей образование подмывов и провисов, с последующей засыпкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бородавкин П.П., Березин В.Л., Шадрин О.Б. Подводные трубопроводы. Москва : Недра. 1979. 415 с.
2. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений : пер. с англ. Москва : Стройиздат, 1979. 319 с.
3. Стандарт ассоциации СА 03-003-07. Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов. Москва, 2007. С. 64.
4. Дроздов Е.В. Теоретические исследования эффективности применения универсальных защитных бетонных матов (УГЗБМ) для защиты подводных трубопроводов. Гидравлические расчеты. Воронеж, 2010. 18 с.
5. Быков Л.И., Мустафин Ф.М. и др. Типовые расчеты при сооружении и ремонте газонефтепроводов. Санкт-Петербург : Недра, 2005. 102 с.
6. Мангус К. Колебания: Введение в исследование колебательных систем : пер. с нем. Москва : Мир, 1982. 304 с.
7. Хижняков В.И., Негодин А.В., Шелков В.А., Тоз А.Н. Особенности проектирования и строительства линейной части магистральных нефтегазопроводов на заболоченных участках трассы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. № 6. С. 167–176.

REFERENCES

1. Borodavkin P.P., Berezin V.L., Shadrin O.B. Podvodnye truboprovody [Underwater pipelines]. Moscow: Nedra, 1979. 84 p. (rus)

2. *Clough R.W., Penzien J.* Dinamika sooruzhenii [Dynamics of structures]. Moscow: Stroizdat, 1979. 320 p. (transl. from Engl.)
3. Standart assotsiatsii SA 03-003-07. Raschety na prochnost' i vibratsiyu stal'nykh tekhnologicheskikh truboprovodov [SA 03-003-07 Standard Association. Strength and vibration analysis of steel pipelines]. Moscow, 2007. 64 p. (rus)
4. *Drozdov E.V.* Teoreticheskie issledovaniya effektivnosti primeneniya universal'nykh zashchitnykh betonnykh matov dlya zashchity podvodnykh truboprovodov. Gidravlicheskie raschety [Theoretical studies of effective use of universal protective concrete mats for underwater pipelines. Hydraulic analysis]. Voronezh, 2010. 18 p. (rus)
5. *Bykov L.I., Mustafin F.M., et al.* Tipovye raschety pri sooruzhenii i remonte gazonefteprovodov [Standard calculations for construction and repair of gas and oil pipelines]. Saint-Petersburg: Nedra, 2005. 102 p. (rus)
6. *Magnus K.* Kolebaniya: Vvedenie v issledovanie kolebatel'nykh sistem [Schwingungen: eine Einführung in die theoretische Behandlung von Schwingungsproblemen]. Moscow: Mir, 1982. 304 p. (transl. from Germ.)
7. *Khizhnyakov V.I., Negodin A.V., Shelkov V.A., Toz A.N.* Osobennosti proektirovaniya i stroitel'stva lineinoi chasti magistral'nykh neftegazoprovodov na zabolochennykh uchastkakh trassy [Design and construction of linear main pipeline on water-logged grounds]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020. V. 22. No. 6. Pp. 167–176. (rus)

Сведения об авторах

Хижняков Валентин Игнатьевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, val@tpu.ru

Негодин Александр Викторович, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, Semerka.82@mail.ru

Бакианский Роман Юрьевич, студент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, rbakshanskiy@mail.ru

Authors Details

Valentin I. Khizhnyakov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, val@tpu.ru

Aleksandr V. Negodin, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, Semerka.82@mail.ru

Roman Yu. Bakshanskii, Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, rbakshanskiy@mail.ru

УДК 625 7/8

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-146-161

*Б. БЕХЗОДИ, К.А. АНДРИАНОВ, А.Ф. ЗУБКОВ,
Тамбовский государственный технический университет*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА С ПРИМЕНЕНИЕМ ХОЛОДНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Отдаленность места строительства от производственной базы, большие объемы работ, недостаточная производительность асфальтобетонных заводов по приготовлению горячих асфальтобетонных смесей делают актуальным вопрос применения холодных асфальтобетонных смесей для строительства дорожных покрытий. В этом случае возможность заранее заготавливать на производственной базе предприятия смеси с учетом сохранности ее свойств в течение нескольких месяцев позволяет увеличивать длительность строительного сезона.

Цель исследования – повышение качества строительства дорожных покрытий нежесткого типа с применением холодных асфальтобетонных смесей.

Рассмотрены расчетные модели конструкции дорожного покрытия с применением холодных асфальтобетонных смесей, уточняющие влияние конструктивных, климатических, технологических и теплофизических свойств материалов на качество устройства покрытия.

Показано, что устройство дорожных покрытий с применением холодных асфальтобетонных смесей на основе битумных материалов (СГ 130-200; БНД 200-300 и МГ 70-130) даже при положительных температурах окружающего воздуха не обеспечивает требуемого качества покрытия.

Для повышения качества устройства дорожных покрытий с применением холодных асфальтобетонных смесей необходимо выполнять нагрев основания перед укладкой слоя холодной смеси. Температура нагрева основания зависит от толщины укладываемого слоя и температуры окружающего воздуха.

Ключевые слова: покрытия нежесткого типа; холодные асфальтобетонные смеси; тепловые процессы; нагрев основания; уплотнение.

Для цитирования: Бехзоди Б., Андрианов К.А., Зубков А.Ф. Моделирование тепловых процессов при строительстве покрытий нежесткого типа с применением холодных асфальтобетонных смесей // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 146–161.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-146-161

*B. BEHZODI, K.A. ANDRIANOV, A.F. ZUBKOV,
Tambov State Technical University*

MODELING OF THERMAL PROCESSES IN CONSTRUCTION OF NONRIGID PAVEMENTS USING BITUMEN CONCRETE MIXES

Relevance. The remoteness of the construction site from the production base, large volumes of work, insufficient productivity of asphalt concrete plants for the preparation of hot asphalt concrete mixtures makes urgent the use of cold bitumen concrete mixes for the road construction. The preliminary mix preparation on the production sites with preservation of

its properties for several months allows to increase the duration of the construction season.

Purpose. Quality improvement of construction of non-rigid road surfaces using cold bitumen concrete mixes. **Materials and methods.** Models of road pavement structure based on cold bitumen concrete mixes are proposed to clarify the influence of the structural, climatic, technological and thermophysical properties of materials on the pavement quality. **Research results.** It is shown that the construction of road surfaces using cold bitumen concrete mixes even at positive ambient temperatures, does not provide the required surface quality. **Conclusions.** To improve the road paving quality using cold bitumen concrete mixes is necessary to heat the base before laying the cold mix. The heating temperature of the base depends on the layer thickness and ambient temperature.

Keywords: nonrigid pavements; cold bitumen concrete mix; thermal process; heating, sealing.

For citation: Behzodi B., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Modelirovanie teplovykh protsessov pri stroitel'stve pokrytii nezhestskogo tipa s primeneniem kholodnykh asfal'tobetonnnykh smesei [Modeling of thermal processes in construction of nonrigid pavements using bitumen concrete mixes]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 2. Pp. 146–161.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-146-161

Введение

Обеспечение жизнедеятельности населенных пунктов, расположенных на значительном удалении от промышленных центров, возможно при наличии путей сообщений. В большинстве случаев доставка грузов осуществляется автомобильным транспортом, который требует наличия автомобильных дорог с твердым покрытием, обеспечивающих доставку разных грузов в течение всего года. В настоящий момент асфальтобетонные покрытия являются основным типом покрытий автомобильных дорог. Для устройства покрытий нежесткого типа применяют асфальтобетонные смеси, которые согласно ГОСТ 9128 можно применять как в горячем, так и холодном состоянии. При выборе материала для устройства покрытия учитывают производственные факторы, влияющие на возможности строительства покрытия и организацию производства работ. С учетом отдаленности места строительства от производственной базы, незначительной интенсивности движения транспортных средств, больших объемах работ и недостаточной производительности асфальтобетонного завода по приготовлению горячей смеси решить данный вопрос возможно за счет применения холодных асфальтобетонных смесей [1, 2]. Это позволяет на производственной базе предприятия заготавливать их заранее и обеспечивает сохранность свойств смеси в течение нескольких месяцев, увеличить длительность строительного сезона и сократить количество транспортных средств в период строительства.

Нормативным документом ПНСТ 362-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные холодные и асфальтобетон» определены области применения холодных асфальтобетонных смесей при устройстве дорожных покрытий. Применение жидких органических вяжущих марок СГ, МГ и МГО по ГОСТ 11955 или модифицированных жидких битумов с условной вязкостью в соответствии с ГОСТ 11955 позволяет сохранять свойства смеси до шести месяцев [3].

Образование тонкой битумной пленки на поверхности минеральных частиц смеси в процессе приготовления способствует слабым микроструктурным связям между частицами при хранении и обеспечивает ее рыхлое состояние в течение длительного времени. Применение менее вязких битумов позволяет укладывать смеси при минусовой температуре окружающего воздуха при условии, что температура смеси должна быть не ниже $+5^{\circ}\text{C}$. Размер фракций минерального материала принимается в интервале от 5,6 до 22,4 мм в зависимости от интенсивности движения транспортных средств и осевой нагрузки. Холодный асфальт выпускают как для устройства покрытия при температуре воздуха от $+15^{\circ}\text{C}$ и выше, так и для ремонтных работ покрытия в течение всего года.

К недостаткам применения холодного асфальта при устройстве дорожного покрытия следует отнести длительный период формирования структуры покрытия (1–1,5 мес.) и более низкие физико-механические характеристики по отношению к покрытиям с применением горячих смесей. Уплотнение слоя смеси выполняют несколькими проходами легких катков статического действия или катками на пневматических шинах. В процессе эксплуатации дороги уплотнение покрытия осуществляется за счет движения транспортных средств. Применение в качестве вяжущего материала битумов требует учета их свойств от температуры. Поэтому в случае устройства покрытия с применением холодных асфальтобетонных смесей без учета свойств смеси практически невозможно обеспечить требуемые показатели покрытия.

Целью данной работы является обоснование технологии устройства покрытия нежесткого типа с применением холодных асфальтобетонных смесей с использованием прогрева основания, обеспечивающей более высокое качество строительства.

Моделирование технологии устройства дорожного покрытия с применением холодных асфальтобетонных смесей

Конструкция автомобильной дороги представляет собой сооружение, состоящее из слоев материалов с разными физико-механическими и теплофизическими свойствами. Количество слоев дорожной одежды зависит от технической категории дороги. При устройстве покрытия с применением холодного асфальта укладка смеси осуществляется одним или двумя слоями. При устройстве щебеночного основания укладывают два слоя покрытия. На дорогах III и IV категорий при условии обеспечения требуемого модуля упругости покрытие может устраиваться в один слой. Минимальная толщина дорожной одежды из холодных асфальтобетонных смесей регламентирована нормативным документом СП 34.13330.2012.

С целью уточнения влияния разных факторов (конструктивных, климатических, технологических и теплофизических свойств материалов) на качество устройства дорожного покрытия с применением холодных асфальтобетонных смесей рассмотрены расчетные модели конструкции дороги. Модели приняты с учетом следующих допущений:

– при устройстве покрытия из асфальтобетона смесь распределяется при температуре, равной температуре окружающего воздуха;

- температура основания перед укладкой смеси имеет одинаковую температуру на захватке;
- материал укладываемого слоя однороден;
- направление тепловых потоков принимается перпендикулярно к поверхности слоя;
- потери тепла в слое происходят за счет теплопроводности применяемого материала;
- температура окружающей среды и скорость воздушных масс в процессе устройства покрытия остаются постоянными;
- сцепление слоев обеспечивает термоконтакт.

Конструктивные расчетные модели представлены в виде дифференциальных уравнений, описывающих процессы нестационарной теплопроводности в слоях дорожной одежды с разными свойствами.

Система дифференциальных уравнений в частных производных имеет следующий вид:

а) для одного слоя покрытия:

- слой покрытия

$$\partial t_1 / \partial \tau = (\lambda_1 / c_1 \gamma_1) (\partial^2 t_1 / \partial x^2 + \partial^2 t_1 / \partial y^2 + \partial^2 t_1 / \partial z^2);$$

- щебеночный слой основания

$$\partial t_2 / \partial \tau = (\lambda_2 / c_2 \gamma_2) (\partial^2 t_2 / \partial x^2 + \partial^2 t_2 / \partial y^2 + \partial^2 t_2 / \partial z^2);$$

- дополнительный слой основания

$$\partial t_3 / \partial \tau = (\lambda_3 / c_3 \gamma_3) (\partial^2 t_3 / \partial x^2 + \partial^2 t_3 / \partial y^2 + \partial^2 t_3 / \partial z^2);$$

- грунт земляного полотна

$$\partial t_4 / \partial \tau = (\lambda_4 / c_4 \gamma_4) (\partial^2 t_4 / \partial x^2 + \partial^2 t_4 / \partial y^2 + \partial^2 t_4 / \partial z^2); \quad (1)$$

б) для двух слоев покрытия:

- верхний слой покрытия

$$\partial t_1 / \partial \tau = (\lambda_1 / c_1 \gamma_1) (\partial^2 t_1 / \partial x^2 + \partial^2 t_1 / \partial y^2 + \partial^2 t_1 / \partial z^2);$$

- нижний слой покрытия

$$\partial t_2 / \partial \tau = (\lambda_2 / c_2 \gamma_2) (\partial^2 t_2 / \partial x^2 + \partial^2 t_2 / \partial y^2 + \partial^2 t_2 / \partial z^2);$$

- щебеночный слой основания

$$\partial t_3 / \partial \tau = (\lambda_3 / c_3 \gamma_3) (\partial^2 t_3 / \partial x^2 + \partial^2 t_3 / \partial y^2 + \partial^2 t_3 / \partial z^2);$$

- дополнительный слой основания

$$\partial t_4 / \partial \tau = (\lambda_4 / c_4 \gamma_4) (\partial^2 t_4 / \partial x^2 + \partial^2 t_4 / \partial y^2 + \partial^2 t_4 / \partial z^2);$$

- грунт

$$\partial t_5 / \partial \tau = (\lambda_5 / c_5 \gamma_5) (\partial^2 t_5 / \partial x^2 + \partial^2 t_5 / \partial y^2 + \partial^2 t_5 / \partial z^2), \quad (2)$$

где x, y, z – координатные оси; t_{1-5} – температура, °С; λ_{1-5} – коэффициент теплопроводности, Вт/(м²·К); c_{1-5} – удельная теплоемкость, Дж/кг·град; γ_{1-5} – объемная плотность кг/м³; τ – время, с.

Экспериментально установлено, что температура слоя и ее распределение в слоях конструкции имеет одинаковое значение в двух плоскостях (x, z) и меняется во времени в плоскости (y). Поэтому решение задачи сводится к расчету температуры в одной плоскости. В общем виде системы уравнений можно представить как

$$\delta t_i / \delta \tau = (\lambda_i c_i \gamma_i) (\delta^2 t_i / \delta^2 t_i^2), \quad \tau > 0, \quad 0 < y_i < h_i, \quad i = 1-5. \quad (3)$$

Начальные условия имеют вид:

а) для одного слоя покрытия:

$$\begin{aligned} t_1|_{(\tau=0)}^{(y=h_1)} &= t_1'; \\ t_2|_{(\tau=0)}^{(y=h_2)} &= t_2' + \Delta t_2 e^{-\mu_2 \cdot y}; \\ t_3|_{(\tau=0)}^{(y=h_3)} &= t_3' + \Delta t_3 e^{-\mu_3 \cdot y}; \\ t_4|_{(\tau=0)}^{(y=h_4)} &= t_4' + \Delta t_4 e^{-\mu_4 \cdot y}; \end{aligned} \quad (4)$$

а) для двухслойного покрытия:

$$\begin{aligned} t_1|_{(\tau=0)}^{(y=h_1)} &= t_1'; \\ t_2|_{(\tau=0)}^{(y=h_2)} &= t_2' + \Delta t_2 e^{-\mu_2 \cdot y}; \\ t_3|_{(\tau=0)}^{(y=h_3)} &= t_3' + \Delta t_3 e^{-\mu_3 \cdot y}; \\ t_3|_{(\tau=0)}^{(y=h_3=0)} &= t_4|_{(\tau=0)}^{(y=h_3=0)}; \\ t_4|_{(\tau=0)}^{(y=h_4)} &= t_4' + \Delta t_4 e^{-\mu_4 \cdot y}; \\ t_5|_{(\tau=0)}^{(y=h_5)} &= t_5' + \Delta t_5 e^{-\mu_5 \cdot y}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $t_1, t_1', t_2, t_2', t_3, t_3', t_4, t_4'$ – температура в начале и на глубине слоя дорожной конструкции, град; e – основание натурального логарифма; μ_i – коэффициент, характеризующий свойства материала; $\Delta t_i e^{-\mu_i y}$ – перепад температуры между поверхностью слоя и рассматриваемой точкой на глубине y .

Граничные условия приняты с учетом следующих допущений:

– соблюдается условие конвективного теплообмена на границе верхнего слоя с окружающей средой

$$\lambda_1 \delta t / \delta y|_{h=0} = \alpha [t(0; \tau) - t_b]; \quad (6)$$

– условие равенства тепловых потоков на границах слоев имеет вид

$$\lambda_i \delta t_i / \delta y_i|_{y_i=h_i} = \lambda_{i+1} \delta_{i+1} / \delta y_{i+1}|_{(y_i=y_{i+1}=0)}, \quad \tau > 0; \quad i = 1, 2, 3, 4, 5; \quad (7)$$

– условие на бесконечность, ограничивающую температуру в полупространстве:

$$t_4|_{(\tau=0)}^{(y=h_4=\infty)} < \infty(t_{\text{очн}}), \quad (8)$$

где h_i – толщина слоев дорожной конструкции, м; τ – время, с; t_b – температура грунта на заданной глубине, °С; $t_{\text{очн}}$ – температура грунта на заданной глубине, °С; $t(0; \tau)$ – температура смеси в момент уплотнения, °С; α – суммарный коэффициент теплоотдачи, величина которого определяется согласно [4, 5]:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_{\text{изл}}, \quad (9)$$

где $\alpha_{\text{изл}}$ – коэффициент теплоотдачи смеси за счет теплового излучения, величина которого зависит от температуры воздуха и смеси; α_k – коэффициент теплоотдачи смеси за счет конвективного обмена с окружающей средой, значение которого определяется из выражения, приведенного ниже:

$$\alpha_k = 4,2V + 3,25 e^{-1,28V}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}),$$

где V – скорость ветра, м/с.

Значение $\alpha_{\text{изл}}$ определяется по следующей формуле [6]:

$$\alpha_{\text{изл}} = \left\{ \xi c \left[(t/100)^4 - (t_{\text{в}}/100)^4 \right] \right\} / (t - t_{\text{в}}), \quad (10)$$

где c – постоянная Стефана – Больцмана ($c = 5,67 \cdot 10^{-8}$, Вт·м⁻²·К⁻⁴); ξ – коэффициент эмиссии, принимается равным 0,9.

С учетом данных, представленных в работе [4], значение коэффициента теплоотдачи асфальтобетонной смеси в зависимости от ее температуры и температуры воздуха определяется по формуле

$$\alpha_{\text{изл}} = 4,05 e^{0,0041t_{\text{см}} + 0,0034t_{\text{возд}}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}). \quad (11)$$

Коэффициент теплопроводности асфальтобетонной смеси зависит от плотности и температуры смеси и определяется зависимостью

$$\lambda = 0,298 e^{0,578\gamma + 0,0898(t/100)}, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}), \quad (12)$$

где γ – плотность смеси, т/м³; t – температура смеси, °C.

Удельная теплоемкость асфальтобетонной смеси, с учетом типа смеси и температуры, определяется по формуле

$$C_{\text{уд}} = 1,371 e^{0,0023t - 0,007\psi}, \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}), \quad (13)$$

где ψ – содержание щебня в смеси, %; t – температура асфальтобетонной смеси, °C.

Известно, что эффективность уплотнения асфальтобетонной смеси достигается в диапазоне динамической вязкости от 10 до 25 Па·с, что соответствует температуре применяемого вяжущего для холодных смесей в пределах от 40 до 65 °C. На рис. 1 представлены зависимости числа циклов приложения нагрузки к горячей смеси от ее температуры при условии получения заданной плотности асфальтобетона с учетом марки битума. Зависимости представлены на основании данных, опубликованных в работе [7].

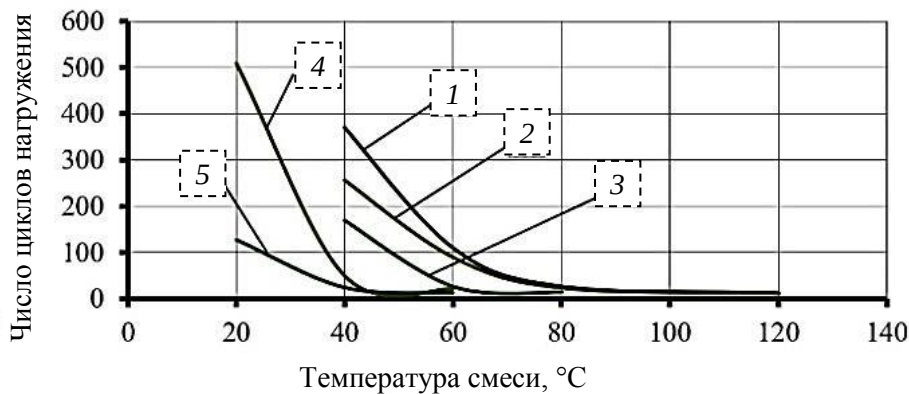


Рис. 1. Зависимость числа циклов приложения нагрузки от температуры смеси:

1 – для смесей с маркой битума БНД 60/90; 2 – БНД 90/130; 3 – БНД 130/200; 4 – БНД 200/300; 5 – СТ 130/200

Для битума марки СГ 130/200 оптимальная температура смеси при уплотнении находится в пределах 42–55 °С, для БНД200/300 – 55–65 °С и МГ70-130 – 40–60 °С [8]. При погрузке в транспортные средства смесь должна быть рыхлой и иметь температуру не выше +25 °С зимой и +30 °С летом. Температура смеси при условии ее длительного хранения равна температуре окружающего воздуха. Поэтому для обеспечения качества устройства покрытия необходимо обеспечить температурные режимы смеси при уплотнении. Нормативными документами определена температура воздуха при устройстве покрытия нежесткого типа. Установлено, что повышение температуры воздуха выше +20 °С способствует нагреву основания за счет солнечной энергии, что необходимо учитывать при расчетах температурных режимов смесей. Доказано, что повышение температуры воздуха выше +40 °С способствует продолжительности работ по уплотнению путем введения в расчетные формулы коэффициента 1,25 [5, 8]. На основании изложенного выше можно сделать вывод, что нагрев основания перед укладкой холодной смеси способствует перераспределению температуры по толщине слоя, что позволяет повысить качество устройства покрытия за счет обеспечения температурных режимов холодных смесей при устройстве покрытия.

Для расчета температуры и ее распределения по толщине слоя в процессе уплотнения с учетом условий производства работ использованы программы [8, 9]. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

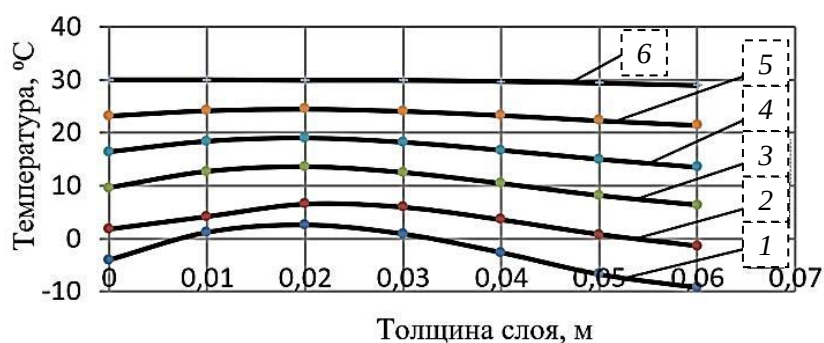


Рис. 2. Распределение температуры по толщине слоя в зависимости от температуры воздуха при температуре смеси при укладке +30 °С без нагрева основания (толщина слоя 0,05 м):
1 – температура воздуха –20 °С; 2 – –10 °С; 3 – 0 °С; 4 – +10 °С; 5 – +20 °С; 6 – +30 °С

На рис. 2 видно, что при укладке холодной асфальтобетонной смеси с использованием битумов независимо от температуры воздуха обеспечить температурные режимы смеси при уплотнении практически невозможно, что приводит к низкому качеству строительства покрытия. Процесс уплотнения слоя холодной асфальтобетонной смеси регламентирован документом СТО НОСТРОЙ 2.25.40-2011.

Холодные асфальтобетонные смеси характеризуются сравнительно большей жесткостью по отношению к горячим смесям. Для обеспечения мак-

симальной плотности при уплотнении материала необходимо учитывать его прочностные характеристики, которые зависят от температуры смеси при уплотнении. Поэтому рекомендуемые параметры уплотняющих катков для повышения их эффективности требуют уточнения. Исследованиями В.Б. Пермякова доказано, что применение тяжелых катков при низких температурах смеси позволяет достичь требуемого коэффициента уплотнения, но при этом снижается предел прочности асфальтобетона от 18 до 30 % в зависимости от типа смеси [10].

Установлено, что процесс нагрева и охлаждения асфальтобетонных смесей относится к нестационарным тепловым процессам. В зоне контакта слоя с пониженной температурой за счет теплопередачи от нагретого слоя основания происходит повышение температуры с последующим охлаждением слоев покрытия. При расчете температурных режимов и продолжительности выполнения работ за расчетную температуру смеси принимают среднюю температуру слоя, которая соответствует температуре слоя, расположенного на расстоянии одной трети толщины от поверхности укладываемого слоя [4].

Распределение температуры по толщине слоя холодной асфальтобетонной смеси зависит от условий производства работ. Установлено, что за счет солнечной радиации температура поверхности превышает температуру окружающего воздуха порядка 30 % [5]. По результатам моделирования представлено распределение температуры смеси при разных условиях производства работ (рис. 3).

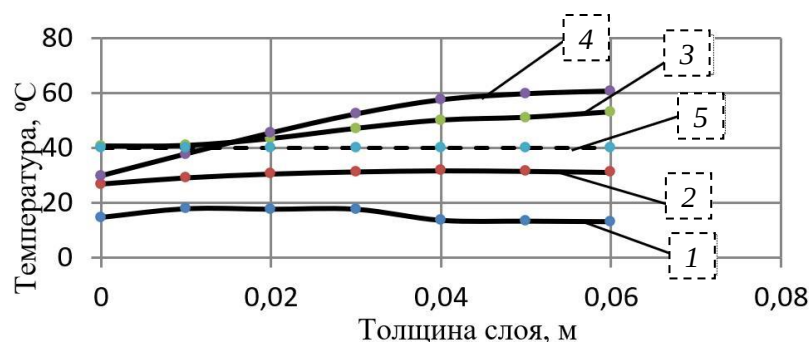


Рис. 3. Распределение температуры смеси при разных условиях производства работ:

1 – температура воздуха +5 °C; 2 – +20 °C; 3 – +30 °C; 4 – нагрев основания до +60 °C; 5 – нижняя граница эффективной температуры уплотнения

Из представленных на рис. 3 данных видно, что температура основания влияет на ее распределение по толщине слоя при укладке. Однако при температуре воздуха до +30 °C обеспечить температурные границы холодной асфальтобетонной смеси на основе битумных вяжущих практически невозможно. Обеспечить температурные режимы смеси и требуемое качество уплотнения возможно за счет нагрева основания. На основании этого можно сделать вывод, что температурные режимы смеси при уплотнении обеспечиваются при превышении температуры воздуха выше 30 °C. При более низких температурах обеспечить температурные режимы смесей можно за счет нагрева основания.

Практикой строительства покрытий с применением горячих асфальтобетонных смесей установлено, что при пониженных температурах воздуха, если предусмотрено устройство нескольких слоев асфальтобетона одного типа смеси, эффективнее укладывать смеси слоями повышенной толщины. Влияние толщины слоя при укладке на распределение температуры по толщине слоя и по времени укладки представлено на рис. 4.

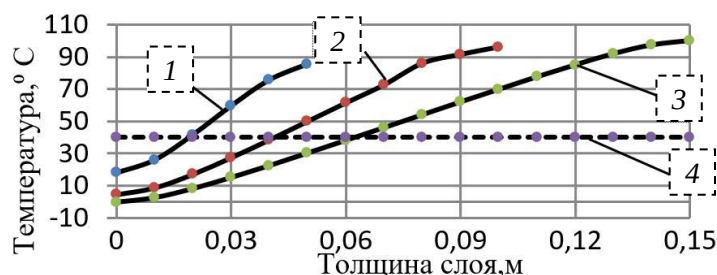


Рис. 4. Изменение средней температуры слоя по толщине через 5 мин после укладки смеси: температура воздуха – минус 10 °С, температура нагрева основания толщиной 0,03 м – +110 °С:
1 – толщина слоя 0,05 м; 2 – 0,1 м; 3 – 0,15 м; 4 – нижняя эффективная температурная граница

Из представленных данных на рис. 4 видно, что увеличение толщины слоя при укладке холодной смеси способствует повышению средней температуры по толщине слоя за счет передачи тепла от нижнего слоя к верхнему. Повышение средней температуры слоя зависит от плотности теплового потока, толщины слоя при укладке и коэффициента теплопроводности применяемого материала. Изменение средней температуры слоя в зависимости от толщины определяется по формулам:

– толщина слоя 0,05 м

$$t = -712037h^3 + 50671h^2 + 370h + 15,57;$$

– толщина слоя 0,1 м

$$t = -77801h^3 + 1266h^2 + 405,1h + 2,49;$$

– толщина слоя 0,15 м

$$t = -29726h^3 + 6490,6h^2 + 305,1h - 1,64, \quad (14)$$

где t – средняя температура слоя, °С; h – толщина слоя, м. Коэффициент корреляции уравнений равен 1,0.

Толщина слоя при укладке влияет на возможную продолжительность выполнения работ с учетом эффективной температуры уплотнения слоя в зависимости от температуры нагрева основания (рис. 5).

Из представленных данных на рис. 5 видно, что в зависимости от толщины слоя температура нагрева основания для прогрева слоя до требуемой средней температуры будет разной. Если при толщине укладываемого слоя 0,05 м температура нагрева основания до 110 °С обеспечивает эффективную температуру смеси при уплотнении, то с увеличением толщины слоя такая температура не обеспечивает температурные режимы уплотнения, что влияет

на качество устройства дорожного покрытия. Время выполнения работы по укладке и уплотнению слоя холодной смеси ограничено и составляет 20 мин, что предъявляет повышенные требования к организации производства работ.

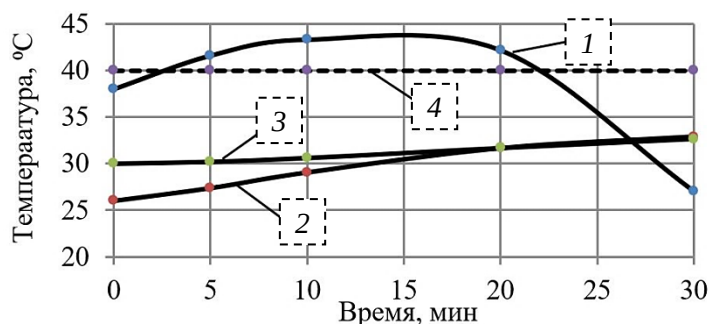


Рис. 5. Изменение средней температуры слоя холодной смеси от толщины во времени при температуре нагрева основания 110 °C:
1 – толщина слоя 0,05 м; 2 – 0,1 м; 3 – 0,15 м

Увеличение температуры нагрева основания и укладка слоя холодной смеси толщиной 0,1 м и выше способствуют при условии достижения средней эффективной температуры смеси уплотнения увеличению продолжительности работы по уплотнению слоя и обеспечению качества строительства покрытия (рис. 6).

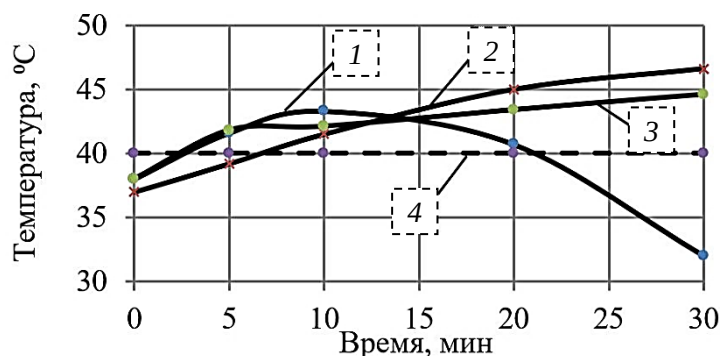


Рис. 6. Продолжительность работы при нагреве основания с разной толщиной слоя покрытия при температуре окружающего воздуха -10 °C:
1 – толщина слоя при укладке 0,05 м и температуре нагрева основания 110 °C; 2 – 0,1 м и 150 °C; 3 – 0,15 м и 140 °C соответственно; 4 – нижняя эффективная температурная граница

Из представленных данных на рис. 6 видно, что в зависимости от толщины слоя при укладке холодной смеси время начала и окончания работ по уплотнению при условии достижения эффективной средней температуры слоя различается. При укладке слоя толщиной 0,05 м и температуре нагрева основания 110 °C начинать процесс уплотнения можно через 3–5 мин после

укладки. Продолжительность уплотнения составляет 18–20 мин. С увеличением слоя укладки (0,1–0,15 м) уплотнение слоя можно начинать через 8–10 мин после укладки слоя холодной смеси. Продолжительность уплотнения составляет 30–40 мин.

При нагреве основания ниже требуемой величины необходимое время для достижения эффективной температуры слоя возрастает, что следует учитывать при организации работ по уплотнению покрытия (рис. 7).

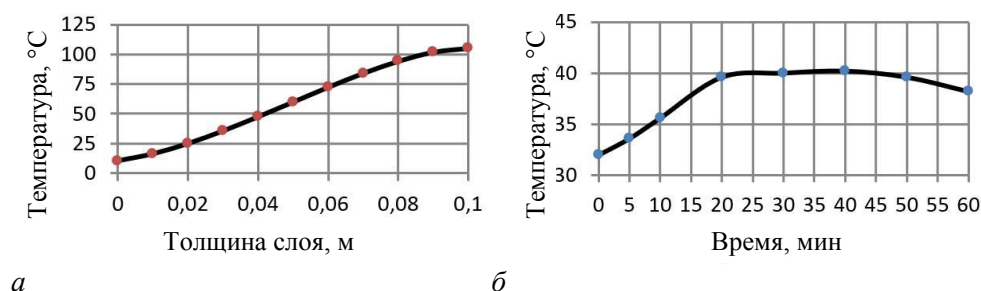


Рис. 7. Распределение температуры по толщине слоя во времени (а) и при нагреве основания 130 °C и толщине слоя 0,1 м (б)

По результатам моделирования установлена зависимость температуры нагрева основания при разных значениях температуры окружающего воздуха, которая представлена на рис. 8.

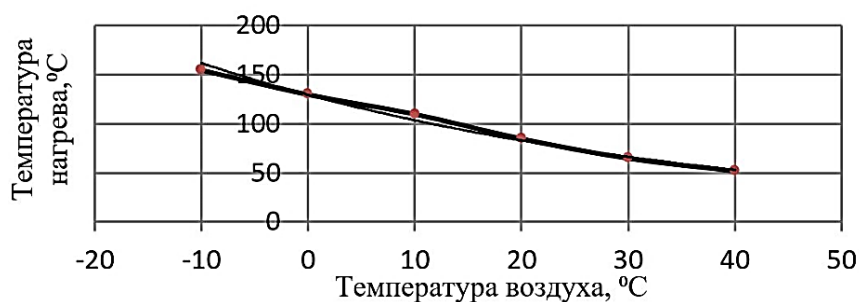


Рис. 8. Зависимость нагрева основания от температуры окружающего воздуха

Численное значение температуры нагрева основания перед укладкой холодной асфальтобетонной смеси с учетом температуры окружающего воздуха определяется по формуле

$$t_{\text{нагр}} = 129,6 e^{-0,022 t_{\text{возд}}}, \quad (15)$$

где $t_{\text{возд}}$ – температура воздуха при укладке, °C. Коэффициент корреляции равен 0,99.

При реконструкции автомобильной дороги и капитальном ремонте дорожных покрытий нежесткого типа широкое применение получили инфракрасные асфальторазогреватели, обеспечивающие температуру нагрева слоя

покрытия. В зависимости от области применения используют асфальтозагреватели с разными техническими характеристиками, выбор которых зависит от времени и интенсивности прогрева, температуры окончания нагрева и мощности асфальтозагревателя. Продолжительность нагрева слоя зависит от мощности теплового потока, технологических режимов работы и геометрических параметров асфальтозагревателя. Продолжительность нагрева слоя асфальтобетона определяется из выражения [11, 12]:

$$\tau = \frac{F_0 h^2}{\alpha}, \quad (16)$$

где h – толщина слоя, м; F_0 – критерий гомохронности Фурье, м; α – коэффициент температуропроводности, м²/ч, который определяется по формуле

$$\alpha = \lambda / c\gamma, \quad (17)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, ккал/(м·ч·град); γ – удельный вес, кг/м³; c – удельная теплоемкость, ккал/(кг·°C).

Продолжительность разогрева слоя асфальтобетона до температуры нагрева 110 °C можно определить на основе данных, представленных в работах [13–16]. Представив данные в относительных значениях, можно установить зависимость времени нагрева от толщины слоя и начальной температуры поверхности, которая имеет вид

$$\tau_{\text{наг}} = 0,66h^2 e^{-0,015t_{\text{см}}}, \quad (18)$$

где h – толщина нагреваемого слоя асфальтобетона, см; $t_{\text{см}}$ – температура асфальтобетона до нагрева, °C. Коэффициент корреляции равен 0,99.

С учетом теплофизических свойств асфальтобетонной смеси скорость перемещения разогревателя с учетом начальной температуры и толщины слоя определяется по формуле

$$V = 0,298l e^{0,578\gamma + 0,0898(t/100)} / 0,19e^{0,023t_{\text{см}} - 0,007\text{ш} + 5,6766\Theta}, \quad (19)$$

где l – длина блока разогревателя, % щебня в смеси; Θ – безразмерная температура асфальтобетона на глубине h при постоянном тепловом потоке, значение которой на глубине слоя асфальтобетона определяется из зависимости

$$\Theta = 0,43e^{1,64 F_h}. \quad (20)$$

Коэффициент корреляции уравнения равен 0,96.

Мощность излучения на поверхности покрытия с учетом постоянного теплового потока определяется из выражения

$$S = \frac{(t_n - t_0) \sqrt{\pi\gamma\lambda c}}{2\sqrt{\tau}}. \quad (21)$$

Эффективность работы разогревателя зависит от интенсивности нагрева слоя асфальтобетона, которая определяется высотой расположения разогревателя над поверхностью полосы покрытия. При постоянном тепловом потоке, в соответствии с экспериментальными данными для горелок с керамическими насадками, высота R установки горелок над покрытием определяется по формуле

$$R = \sqrt{\frac{320}{S}}. \quad (22)$$

Для расчета режимов работы разогревателя разработано программное обеспечение с использованием программы Labview, позволяющее определять технологические параметры разогревателя с учетом конструктивных и погодных условий производства работ [17–20].

Значения скорости перемещения разогревателя от температуры воздуха при толщине слоя 0,02 и 0,03 м могут быть рассчитаны по уравнениям, представленным в табл. 1.

Таблица 1

**Зависимость скорости перемещения разогревателя
от температуры асфальтобетона**

Длина блока разогревателя, м	Глубина нагрева, м	Скорость перемещения, м/мин	Коэффициент корреляции
1,25	0,02	$V = 0,76e^{0,0151t_a}$	0,99
2,00	0,02	$V = 0,46e^{0,0151t_a}$	0,99
1,25	0,03	$V = 0,39e^{0,0153t_a}$	0,99
2,00	0,03	$V = 0,25e^{0,0149t_a}$	0,99

На основании уточненной методики по расчету параметров инфракрасного разогревателя в табл. 2 представлены результаты расчета технологических режимов при разогреве слоя асфальтобетона толщиной 0,03 м от –10 до +110 °С при разной температуре асфальтобетона.

Таблица 2

**Технологические режимы разогревателя при нагреве слоя
асфальтобетона толщиной 0,03 м и длине блока разогревателя 2,0 м**

Температура воздуха, °С	Время нагрева, мин	Высота расположения горелки относительно поверхности, м	Мощность излучения, кВт/м ²	Скорость перемещения разогревателя, м/мин
–10	6,9	0,17	8,1	0,29
0	5,9	0,20	7,4	0,34
10	5,1	0,20	7,1	0,39
20	4,4	0,20	6,9	0,45
30	3,8	0,20	6,5	0,53

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– устройство дорожных покрытий с применением холодных асфальтобетонных смесей на основе битумных материалов (СГ 130/200; БНД 200/300 и МГ 70-130) даже при положительных температурах окружающего воздуха до +30 °С не обеспечивает требуемого качества покрытия;

- для повышения качества устройства дорожных покрытий с применением холодных асфальтобетонных смесей необходимо осуществлять нагрев основания перед укладкой слоя;
- температура нагрева основания зависит от толщины слоя укладки холодной смеси в дорожное покрытие;
- установлена зависимость температуры нагрева основания от температуры воздуха.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калгин Ю.И., Строкин А.С., Тюков Е.Б. Перспективные технологии строительства и ремонта дорожных покрытий с применением модифицированных битумов. Воронеж, 2014. 223 с.
2. Руденский А.В. Холодный асфальтобетон. Возможности продления сезона строительных и ремонтных работ // Новости в дорожном деле : науч.-техн. информ. сб. Москва : Информавтодор, 2006. Вып. 1. С. 11–42.
3. Калгин Ю.И. Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов. Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2006. 272 с.
4. Зубков А.Ф., Андрианов К.А., Антонов А.И., Однолько В.Г. Технология строительства и ремонта дорожных покрытий нежесткого типа с учетом температурных режимов асфальтобетонных смесей. Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2017. 315 с.
5. Ладыгин Б.И. Прочность и долговечность асфальтобетона // Наука и техника. Минск, 1972. 81 с.
6. Ларионов Н.Н. Общая теплотехника. Москва : Стройиздат, 1975. 559 с.
7. Гезенцев Л.Б., Горелышев Н.В., Богуславский А.М., Королев И.В. Дорожный асфальтобетон / под ред. Л.Б. Гезенцева. Изд. второе. Москва : Транспорт, 1985. 350 с.
8. Зубков А.Ф. Расчет нагрева толщины слоя асфальтобетона по времени. Свидетельство № 2006613129 о регистрации программы для ЭВМ : опубл. 5.09.2006 г.
9. Зубков А.Ф., Андрианов К.А., Макаров А.М., Антонов А.И., Бехзоди Б. Моделирование и расчет температурных режимов дорожных одежд нежесткого типа в нестационарных условиях. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020660065 от 27.08.2020 г.
10. Пермяков В.Б. Эффективность уплотнения асфальтобетонных смесей в дорожных покрытиях // Строительные материалы. 2005. № 10. С. 8–9.
11. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. Ленинград : Энергия, 1968. 304 с.
12. Zubkov A.F., Ledenev V.I., Kupriyanov R.V. A study of temperature modes and strength characteristics of stone-mastic asphalt // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2014. № 1 (21). P. 54–64.
13. Villiers R.L. Maintenance engineering standards to fulfil the legal duty of road authorities towards saferoads // Dissertation presented for the Degree of Doctor of Philosophy (Stellenbosch University). 2016, March. 246 p. URL: <https://scholar.sun.ac.za>
14. Wang P., Hu Y., Dai Y., Tian M. Asphalt Pavement Pothole Detection and Segmentation Based on Wavelet Energy Field // Journal Mathematical Problems in Engineering. 2017. 13 p. URL: <https://doi.org/10.1155/2017/1604130>
15. Hot Mix Asphalt Repair // Sitemap Pavement Resources Inc. URL: <http://pavement-resources.com/hot-mix-asphalt-repair>.
16. Цуников С.Г. Справочник дорожного мастера. Строительство, эксплуатация и ремонт автомобильных дорог. Москва : Инфра-Инженерия, 2009. 924 с.
17. Yevseev Ye.Yu., Matveev V.N., Zubkov A.F., Ledenev V.I. Modeling of contact stresses in vibration plates and hot asphalt mix for road surfacing repairs // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2013. № 3 (19). С. 52–62.

18. Kupriyanov R.V., Luzgachev V.A., Zubkov A.F. Determining the temperature of the asphalt mix during the construction of asphalt concrete non-rigid pavement // *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2016. № 1 (29). P. 63–74.
19. Kuprianow R., Andrianow K., Zubkow A., Plewa A. Analiza zmian temperatury ukladanych warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych w strefie spoiny podluznej // *Budownictwa i Inzynierii Srodowiska*. 2015. № 3. P. 113–117.
20. Зубков А.Ф., Куприянов Р.В. Программа по расчету параметров инфракрасных разогревателей для асфальтобетонного покрытия. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015616928, 25.06.2015 г.

REFERENCES

1. Kalgin Yu.I., Strokin A.S., Tyukov E.B. Perspektivnye tekhnologii stroitel'stva i remonta dorozhnykh pokrytii s primeneniem modifitsirovannykh bitumov [Promising technologies for construction and repair of road pavements using modified bitumen]. Voronezh, 2014. 223 p. (rus)
2. Rudenskii A.V. Kholodnyi asfal'tobeton. Vozmozhnosti prodleniya sezona stroitel'nykh i remontnykh rabot [Cold bitumen concrete. Possibilities for extending the construction and repair period]. Moscow: Informavtodor, 2006. No. 1. Pp. 11–42. (rus)
3. Kalgin Yu.I. Dorozhnye bitumomineral'nye materialy na osnove modifitsirovannykh bitumov [Bituminous mineral road materials based on modified bitumen]. Voronezh, 2006. 272 p. (rus)
4. Zubkov A.F., Andrianov K.A., Antonov A.I., Odnol'ko V.G. Tekhnologiya stroitel'stva i remonta dorozhnykh pokrytii nezhestkogo tipa s uchedom temperaturnykh rezhimov asfal'tobetonnykh smesei [Construction and repair of nonrigid pavements and temperature behaviour of asphalt mixes]. Tambov, 2017. 315 p. (rus)
5. Ladygin B.I. (Ed.) Prochnost' i dolgovechnost' asfal'tobetona [Strength and durability of bitumen concrete]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1972. 81 p. (rus)
6. Larikov N.N. Obshchaya teplotekhnika [General heat engineering]. Moscow: Stroiizdat, 1975. 559 p. (rus)
7. Gezentsvei L.B. (Ed.), Gorelyshev N.V., Boguslavskii A.M., Korolev I.V. Dorozhnyi asfal'tobeton [Road bitumen concrete]. Moscow: Transport, 1985. 350 p. (rus)
8. Zubkov A.F. Raschet nagreva tolshchiny sloya asfal'tobetona po vremeni [Time calculation of heating bitumen concrete layer thickness]. RF Certificate of State Registration of Software N 2006613129, 2006. (rus)
9. Zubkov A.F., Andrianov K.A., Makarov A.M., Antonov A.I., Bekhzodi B. Modelirovanie i raschet temperaturnykh rezhimov dorozhnykh odezhd nezhestkogo tipa v nestatsionarnykh usloviyakh [Temperature modelling and calculation nonrigid pavements under nonstationary conditions]. RF Certificate of State Registration of Software N 2020660065, 2020. (rus)
10. Permyakov V.B. Effektivnost' uplotneniya asfal'tobetonnykh smesei v dorozhnykh pokrytiyakh [Efficiency of compaction of bitumen concrete mixes for road pavements]. *Stroitel'nye materialy*. 2005. No. 10. Pp. 8–9. (rus)
11. Pekhovich A.I., Zhidkikh V.M. Raschety teplovogo rezhima tverdykh tel [Heat calculation of solids]. Leningrad: Energiya, 1968. 304 p. (rus)
12. Zubkov A.F., Ledenev V.I., Kupriyanov R.V. A study of temperature modes and strength characteristics of stone-mastic asphalt. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2014. No. 1 (21). Pp. 54–64. (rus)
13. Villiers R.L. Maintenance engineering standards to fulfil the legal duty of road authorities towards saferoads. Dissertation presented for the Degree of Doctor of Philosophy (Stellenbosch University). 2016. 246 p. Available: <https://scholar.sun.ac.za>
14. Wang P., Hu Y., Dai Y., Tian M. Asphalt pavement pothole detection and segmentation based on wavelet energy field. *Journal Mathematical Problems in Engineering*. 2017. 13 p. DOI: 10.1155/2017/1604130
15. Hot mix asphalt repair. Sitemap Pavement Resources Inc. Available: <http://pavement-resources.com/hot-mix-asphalt-repair>

16. Tsupikov S.G. (Ed.) Spravochnik dorozhnogo mastera. Stroitel'stvo, ekspluatatsiya i remont avtomobil'nykh dorog [Road Master's Handbook. Construction, maintenance and repair of roads]. Moscow: Infra-Inzheneniya, 2009. 924 p. (rus)
17. Yevseev Ye.Yu., Matveev V.N., Zubkov A.F., Ledenev V.I. Modeling of contact stresses in vibration plates and hot asphalt mix for road surfacing repairs. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2013. No. 3 (19). Pp. 52–62.
18. Kupriyanov R.V., Luzgachev V.A., Zubkov A.F. Determining the temperature of the asphalt mix during the construction of asphalt concrete non-rigid pavement. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2016. No. 1 (29). Pp. 63–74.
19. Kuprianow R., Andrianow K., Zubkow A., Plewa A. Analiza zmian temperatury ukladanych warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych w strefie spoiny podluznej. *Budownictwa i Inzynierii Srodowiska*. 2015. No. 3. Pp. 113–117.
20. Zubkov A.F., Kupriyanov R.V. Programma po raschetu parametrov infrakrasnykh razogrevatelei dlya asfal'tobetonnoho pokrytiya [Parameter calculation program for infrared pavement heaters for bitumen concrete pavements]. RF Certificate of State Registration of Software N 2015616928, 2015. (rus)

Сведения об авторах

Бехзоди Бахтиёр, аспирант, Тамбовский государственный технический университет, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Е, gsia@mail.tambov.ru

Андрюанов Константин Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, Тамбовский государственный технический университет, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Е, konst-68@yandex.ru

Зубков Анатолий Федорович, докт. техн. наук, профессор, Тамбовский государственный технический университет, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Е, afzubkov2013@yandex.ru

Authors Details

Bakhtiyor Behzodi, Research Assistant, Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., 392000, Tambov, Russia, gsia@mail.tambov.ru

Konstantin A. Andrianov, PhD, A/Professor, Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., 392000, Tambov, Russia, konst-68@yandex.ru

Anatoly F. Zubkov, DSc, Professor, Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., 392000, Tambov, Russia, afzubkov2013@yandex.ru