

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный
архитектурно-строительный университет

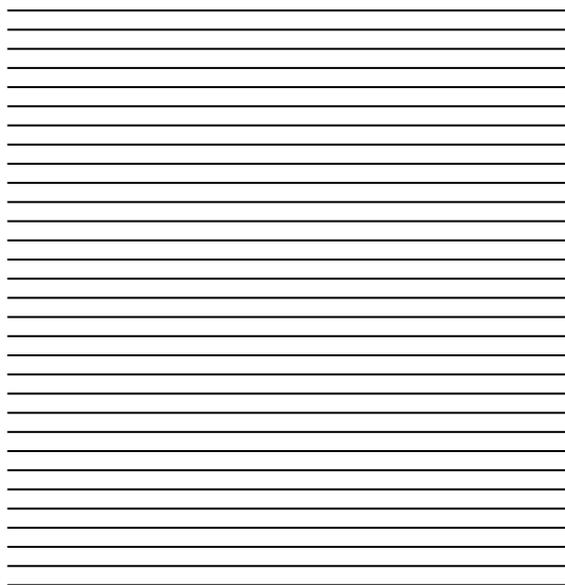
ВЕСТНИК

ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Том 23

№ 4 _____ 2021
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с апреля 1999 г.



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ляхович Л.С., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, зав. кафедрой строительной механики ТГАСУ; lls@tsuab.ru; г. Томск
Акимов П.А., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, главный ученый секретарь РААСН; pavel.lakimov@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; vgg-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
Детярев 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; dzy1956@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
Инжутов И.С., докт. техн. наук, профессор, директор инженерно-строительного института СФУ; iinzhutov@sfu-kras.ru; г. Красноярск
Кнайка 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; cvrkast@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
Кумпяк 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; lucaplacidi@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/>; «Российская государственная библиотека»: <https://www.rsl.ru/>; «Томская областная универсальная научная библиотека имени А.С. Пушкина»: <https://www.lib.tomsk.ru/>; «EBSCO»: <https://www.ebsco.com>; «КиберЛенинка»: <https://cyberleninka.ru/>; «IPRbooks»: www.iprbookshop.ru, а также на сайте «Вестник ТГАСУ»: <https://vestnik.tsuab.ru>

Научное издание

ВЕСТНИК ТГАСУ № 4 – 2021

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)

ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

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

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

Редакторы Т.С. Володина, Г.Г. Семухина.

Переводчик М.В. Воробьева. Дизайн Е.И. Кардаш.

Технический редактор Н.В. Удлер.

Подписано в печать 20.08.2021. Формат 70×108/16. Гарнитура Таймс.

Уч.-изд. л. 11,64. Усл. печ. л. 13,83. Тираж 200 экз.

Зак. № 74.

Дата выхода: 25.08.2021.

Цена: свободная.

Адрес редакции/издателя: 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

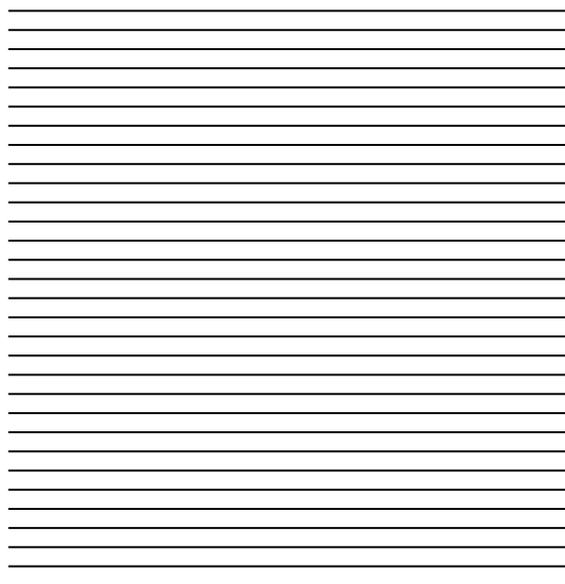
VESTNIK
TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO
ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA

JOURNAL
OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Volume 23

№ 4 2021
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since April 1999



EDITORIAL STAFF

Lyakhovich L.S., DSc, Professor, RAACS Academician, Chief Editor, Head of Structural Mechanics Dept., TSUAB; *lls@tsuab.ru*, Tomsk, Russia
Akimov P.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Chief Academic Secretary; *pavel.akimov@gmail.com*, Moscow, Russia
Belostotskii A.M., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Director General Research Center StaDiO; *amb@stadyo.ru*, Moscow, Russia
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
Chernyshov E.M., DSc, Professor, RAACS Academician, Chairman of the Presidium of RAACS Central Regional Branch; *chem@vgasu.vrn.ru*, Voronezh, Russia
Chiaia B., PhD, Professor, Politecnico di Torino (Polytechnic University of Turin); *bernardino.chiaia@polito.it*, Turin, Italy
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
Dzyubo V.V., DSc, Professor, Department of Water Supply and Sewage Systems, TSUAB; *dzy1956@mail.ru*, Tomsk, Russia
Efimenko V. N., DSc, Professor, Dean of Road Engineering and Construction Faculty, Head of Automobile Roads Dept., TSUAB; *svfeimenko_80@mail.ru*, Tomsk, Russia
Efimenko S.V., DSc, Dean of Road Engineering and Construction Faculty, TSUAB; *svfeimenko_80@mail.ru*, Tomsk, Russia
Esaulov G.V., DSc, Professor, RAACS Academician, Vice-Rector for Research of Moscow Architectural Institute (State Academy); *esaulovgv@raasn.ru*, Moscow, Russia
Girardot M.C., DSc, Professor, Engineering Dept., International Telematic University UNINETTUNO; *g.cennamo@uninettunouniversity.net*, Roma, Italy
Gnyrya A.I., DSc, Professor, RAACS Adviser, Head of Construction Engineering Technology Dept., TSUAB; *isp_tgasu@mail.ru*, Tomsk, Russia
Il'ichev V.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Vice President; *ilyichev@raasn.ru*, Moscow, Russia
Inzhutov I.S., DSc, Professor, Director School of Engineering and Construction, SibFU; *inzhutov@sfu-kras.ru*, Krasnoyarsk, Russia
Kopanitsa N.O., DSc, Professor, Building Materials and Technologies Dept., TSUAB; *kopanitsa@mail.ru*, Tomsk, Russia
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
Kudyakov A.I., DSc, Professor; RAACS Adviser, Head of Construction Engineering Technology Dept., TSUAB (Tomsk, Russia); *kudyakov@tsuab.ru*
Kumpyak O.G., DSc, Professor; RAACS Adviser, Head of Reinforced Concrete and Masonry Structures Dept., TSUAB; *kumpyak@yandex.ru*, Tomsk, Russia
Lezhava I.G., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Vice President, Moscow Architectural Institute (State Academy); *lezhavailia@gmail.com*, Moscow, Russia
Morozov V.I., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Head of Engineering Constructions Dept., SPSUACE; *morozov@spbgasu.ru*, St-Petersburg, Russia
Ovsyannikov S.N., DSc, Professor, Head of Architecture of Civil and Industrial Buildings Dept., TSUAB; *ovsn@tsuab.ru*, Tomsk, Russia
Plachidi L.L., DSc, A/Professor, Engineering Dept., International Telematic University UNINETTUNO; *luca.placidi@uninettunouniversity.net*, Roma, Italy
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
Pustovetov G.I., DSc, Professor, RAACS Correspondent Member, Adviser Novosibirsk State University of Architecture, Design and Fine Arts; *pustovetovgi@gmail.com*, Novosibirsk, Russia
Skolubovich Yu.L., DSc, Professor, RAACS Correspondent Member, Rector Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering; *sjl1964@mail.ru*, Novosibirsk, Russia
Shubin L.L., DSc, RAACS Corresponding Member, Director Structural Physics Research Institute, RAACS; *niisf@niisf.ru*, Moscow, Russia
Tsvetkov N.A., DSc, Professor, Head of Heat and Gas Supply Dept., TSUAB; *nac@tsuab.ru*, Tomsk, Russia
Travush V.I., DSc, Professor, RAACS Vice President, RAACS Academician; *travush@mail.ru*, Moscow, Russia
Vlasov V.A., DSc, Professor, Rector, TSUAB; *rector@tsuab.ru*, Tomsk, Russia
Volokitin G.G., DSc, Professor, Head of Applied Mechanics and Materials Science Dept., TSUAB; *vvgg-tomsk@mail.ru*, Tomsk, Russia
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.rsl.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 № 4 – 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.

Founder: Tomsk State University of Architecture and Building

Editors T.S. Volodina, G.G. Semukhina
Translator M.V. Vorob'eva. Design: E.I. Kardash
Technical editor N.V. Udler

Passed for printing: 20.08.2021. Paper size: 70×108/16. Typeface: Times New Roman
Published sheets: 11,64. Conventional printed sheets: 13,83. Print run: 200 copies

Issue date: 25.08.2021.
Price: free.

Order N 74.

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

Костова Е.В. Концептуальные основы советской архитектуры сталинского периода (НГУАДИ, г. Новосибирск).....	9
Мамедова Э.Э. Садово-парковая территория усадьбы купца Ф.А. Горохова в Томске (середина XIX в.) (ТГАСУ, г. Томск)	19
Рылова А.К., Астахова Е.С. Архитектурные особенности учебных центров профессиональной переподготовки на примере г. Ростова-на-Дону (ЮФУ, г. Ростов-на-Дону).....	31
Шутка А.В., Гурьева Е.И. Градостроительная концепция формирования рекреационных территорий города (на примере скверов Железнодорожного района города Воронежа) (ВГТУ, г. Воронеж).....	46

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Акимов П.А., Ляхович Л.С. Прицельное регулирование спектра частот собственных колебаний упругих пластин с конечным числом степеней свободы масс путём введения дополнительных обобщённых связей и обобщённых кинематических устройств (НИ МГСУ, г. Москва, ТГАСУ, г. Томск).....	57
Трепутнева Т.А., Монсенко М.О., Попов О.Н., Барашков В.Н., Песцов Д.Н. Напряжённо-деформированное состояние подкреплённых тонкостенных элементов конструкций (ТГАСУ, г. Томск)	69

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Матвиенко О.В., Литвинова А.Е. Исследование установившегося течения высокопарафинистого битумного вяжущего, описываемого моделью Балкли – Гершеля, в цилиндрической трубе (ТГАСУ, НИ ТГУ, г. Томск).....	79
---	----

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

Кривошеин Ю.О., Цветков Н.А., Петрова А.В., Толстых А.В., Немова Т.Н. Возможности энергосбережения при работе циркуляционного насоса в гидравлическом контуре коллекторов солнечных водонагревательных систем (ТГАСУ, г. Томск)	100
Белоус А.Н., Кулумбегова Л.З., Белоус О.Е. Определение теплоустойчивости малоинерционных ограждающих конструкций (ДонНАСА, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ЮОГУ, Республика Южная Осетия, г. Цхинвал)	112

Артамонов П.А., Паршина А.А. Повышение энергоэффективности котлового контура котельной (ТИУ, г. Тюмень).....	120
---	-----

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Филимонов А.А., Липихин Д.В., Мельников А.Е., Кирьянова К.В. Проектирование промышленных подземных трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах с использованием современных комплексов проектирования (АО «ТомскНИПИнефть», г. Томск).....	127
--	-----

Климов А.С., Емельянов Р.Т., Чумакова Е.В., Климова О.Л. Метод охлаждения околосвайных многолетнемерзлых грунтов в зоне экстремального северного климата (СФУ, г. Красноярск).....	138
---	-----

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

Ефименко В.Н., Ефименко С.В., Каримов Э.М., Мамажакыпова Г.Т. Прикладное значение спутниковой модели ТМРА при установлении нормы годового количества атмосферных осадков по дорожно-климатическим зонам на территории Юго-Западного Кыргызстана (ТГАСУ, г. Томск, ОшТУ, Кыргызская Республика, г. Ош).....	147
---	-----

C O N T E N T S

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Kostova E.V. Conceptual frameworks of Stalinist Soviet architecture (Novosibirsk).....	9
Mamedova E.E. Garden and park territory of F.A. Gorokhov's mansion in Tomsk in the middle of the 19th century (Tomsk)	19
Rylova A.K., Astakhova E.S. Architectural style of professional development centers in Rostov-on-Don (Rostov-on-Don)	31
Shutka A.V., Gureva E.I. Urban planning concept of recreational area formation (the Voronezh case studies) (Voronezh).....	46

BUILDING AND CONSTRUCTION

Akimov P.A., Lyakhovich L.S. Precision control for eigen-frequency of elastic plates with finite number of mass degrees of freedom by using additional generalized connections and kinematic devices (Moscow, Tomsk)	57
Treputneva T.A., Moiseenko M.O., Popov O.N., Barashkov V.N., Pestsov D.N. Stress-strain state of reinforced thin-walled structural elements (Tomsk)	69

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Matvienko O.V., Litvinova A.E. Steady flow of high-paraffin bituminous binder in cylindrical tube in terms of Herschel – Bulkley fluid (Tomsk)	79
---	----

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

Krivoshein Yu.O., Tsvetkov N.A., Petrova A.V., Tolstykh A.V., Nemova T.N. Energy-efficient circulating pump in hydraulic circuit of solar collectors of hot-water systems (Tomsk)	100
Belous A.N., Kulumbegova L.Z., Belous O.E. Heat stability of low-inertia building envelopes (Makiivka, Donetsk People's Republic, Tskhinvali, Republic of South Ossetia).....	112
Artamonov P.A., Parshina A.A. Energy efficiency improvement of hydraulic circuit of boiler plant (Tyumen)	120

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Filimonov A.A., Lipikhin D.V., Mel'nikov A.E., Kir'yanova K.V. Modern design system for field underground pipeline construction in permafrost soils (Tomsk)	127
Klimov A.S., Emelyanov R.T., Chumakova E.V., Klimova O.L. Cooling of near-pile permafrost soils in the Arctic region (Krasnoyarsk)	138

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

Efimenko V.N., Efimenko S.V., Karimov E.M., Mamagakipova G.T. TMPA satellite model applied for determination of annual precipitations in road-building climatic zones in southwest Kyrgyzstan (Tomsk, Osh, Kyrgyz Republic)	147
--	-----

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 72.036

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-9-18

*Е.В. КОСТОВА,
Новосибирский государственный университет архитектуры,
дизайна и искусств*

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ СОВЕТСКОЙ АРХИТЕКТУРЫ СТАЛИНСКОГО ПЕРИОДА

Актуальность темы определяется необходимостью освоения отечественного архитектурного наследия в поисках альтернативы архитектуре постмодернизма. В статье на основе сравнительного анализа раскрывается общая схема развития западной (от монизма к плюрализму) и отечественной (от плюрализма к монизму) архитектуры.

С помощью социально-исторического метода выявляются идейные истоки советской архитектуры сталинского периода в рамках парадигмы пролетарской культуры. В архитектурном контексте её ядро – фундаментальный доклад выдающегося пролетарского культуролога А.В. Луначарского.

С системной точки зрения архитектура сталинского ампира предстаёт как непрерывный организационный процесс, направленный в сторону всё большего многообразия, полноты, гармонии и синергии.

Ключевые слова: сталинский ампир; советская неоклассика; архитектурное стилеобразование; история советской культуры; Пролеткульт; системный подход.

Для цитирования: Костова Е.В. Концептуальные основы советской архитектуры сталинского периода // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 9–18.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-9-18

*E. V. KOSTOVA,
Novosibirsk State University of Architecture, Design and Fine Arts*

CONCEPTUAL FRAMEWORKS OF STALINIST SOVIET ARCHITECTURE

The paper presents the comparative analysis of the European (from monism to pluralism) and Russian (from pluralism to monism) architecture.

The social and historical methods identify the ideological origins of the Soviet architecture of the Stalinist period within the paradigm of the proletarian culture. In the architectural context, the fundamental report by A.V. Lunacharsky, the outstanding proletarian cultural specialist, is core of the Soviet architecture.

From a systemic point of view, the architecture of the Stalinist period is presented as a continuous organizational process directed toward its diversity, completeness, harmony, and synergy.

Keywords: Stalinist period; Soviet Neo-classical architecture; architectural style; soviet culture; systems approach.

For citation: Kostova E.V. Kontseptual'nye osnovy sovetskoj arkhitektury stalin'skogo perioda [Conceptual frameworks of Stalinist Soviet architecture]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 4. Pp. 9–18.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-9-18

Анализ общих закономерностей стилеобразования в советской архитектуре 30–50-х гг. XX в. содержится в трудах М.И. Астафьевой-Другач, М.Г. Бархина, А.В. Иконникова, В.З. Паперного, Д.С. Хмельницкого, А.В. Рябушина, В.Э. Хазановой, С.О. Хан-Магомедова, Ю.Л. Косенковой, И.А. Азизян и др. Но выявление концептуальных основ советского неоклассицизма в контексте советской культурной революции до сих пор остаётся малоизученным.

Системообразующим фактором советского культурного процесса была организация Пролеткульта, и этот феномен активно изучается в последнее время такими исследователями, как И.А. Лапина, А.В. Карпов, Л.А. Булавка, Т.Н. Захарова, А.Ю. Морозова и др. Все прочие многочисленные направления в сфере искусства (авангардисты, романтики, конструктивисты, рационалисты, футуристы) были всего лишь стихийными попутчиками коллективистического строя.

Цель настоящей работы – показать непосредственную связь советской архитектуры сталинского периода с пролеткультовской идеологией коллективизма, что и предопределило формирование архитектурной парадигмы советского неоклассицизма и её специфику.

Чтобы понять различие между отечественной коллективистической архитектурой и западной индивидуалистической, нужно в общих чертах рассмотреть основные тенденции развития мировой архитектуры.

С позиций советской архитектуры сталинского периода, подкреплённых актуальной системной концептуальной критикой, развитие западной архитектуры представляется как противоречивый процесс постепенной диссипации стиля через целый ряд «замирающих» кризисов в сторону эклектичности и тотального плюрализма. Критическая точка отсчёта – это наследница античности, богатая архитектура эпохи Возрождения, с которой и начинается неуклонная тенденция стилистической дифференциации в виде пока ещё ярких барокко и рококо – это уже определённое понижение степени полноты и разносторонности стиля. Затем наступает «замирающий» кризис очередного порядка, ещё одна непродолжительная вспышка – ампир, который вскоре трансформируется в эклектику XIX в. с её подражанием самым разнообразным стилям всевозможных предыдущих эпох. В конце XIX в. в западноевропейской архитектуре на фоне тотального культурного декаданса происходит очередная вспышка, разумеется, ещё более бледная, чем каждая из предыдущих: это попытка создать что-то своё исключительно оригинальное, сверхиндивидуальное – так сформировался стиль модерн. Однако и он вскоре переходит в состояние хаотичности вследствие слабости и фрагментированности стиля. Гармония целого заменяется гармонией мелочей. Конечно, архитектур-

ные шедевры продолжают создаваться, но это определяется не стилем, а талантом отдельных архитекторов.

Поскольку на этом процесс диссипации пока не завершился, тенденция его развития должна была породить хоть какую-то следующую вспышку, пусть даже самую небольшую: и вот в начале XX в. возникает чисто инженерный, геометрический стиль – функционализм, суть которого – в соответствии здания своему назначению. Новый строительный материал – железобетон – позволял создавать предельно рациональные прямоугольные архитектурные конструкции, на бытовом жаргоне получившие название «коробки»: «всё вокруг – геометрия», «машинизм», антропоцентризм [1, с. 72–73]. Это было по существу нигилистическое направление в архитектуре (даже Корбюзье стал тяготеть к трудовому коллективизму), которое закономерно сменилось обратным процессом – попыткой возврата к классицизму. Так западноевропейская архитектура перед окончательным затуханием вспыхнула ещё раз. Понятно, что чистого возврата к классике быть не могло, поскольку появились новые строительные технологии плюс ко всему новый материал – железобетон, который в сочетании со стеклом давал архитектурному творчеству массу возможностей. Однако весь этот потенциал вскоре тоже прогорел, угас и упростился в сплошной дисгармонии постмодернизма – западноевропейский архитектурный стиль окончательно атрофируется в «архитектурной иллюзии», гиперреальности и виртуальности: «архитектура дальше уже не существует... она и не может уже существовать» [2, с. 390, 397].

Безысходный процесс диссипации не может продолжаться бесконечно, он всегда доходит до известного предела. Итак, цепочка «затухающих» кризисов наконец-то обрывается, западноевропейский архитектурный дезорганизационный процесс замирает в иррациональном и дисгармоничном постмодернизме. Таким образом, налицо схема регрессивного развития западной архитектуры – от монизма к плюрализму, т. е. к эклектике и постмодернизму, к разложению и распаду стиля. Наоборот, русская архитектура в своём прогрессивном развитии идёт в противоположном направлении – от плюрализма к монизму, от хаоса к порядку, синтезу, всё большей гармонии и целостности, интенсивности и многообразию интегрального стиля. Это объясняется организационными различиями в условиях среды и эволюционном состоянии биополярных архитектурных систем России и Запада.

Когда мы приезжаем в Западную Европу, мы восхищаемся архитектурой зданий модерна и постмодерна, но понимаем, что они созданы не для всего общества, а для одного богатого заказчика. В этом, собственно, и заключается разница между индивидуализмом и коллективизмом в архитектуре.

До Октябрьской революции наша отечественная архитектура находилась в состоянии плюрализма, системного неравновесия, во многом ассимилируя западные образцы. После революции в советской архитектуре господствовал конструктивизм. Затем наступает положительный кризис «взрывного» типа – стремительный организационный переход к новому формообразованию. Точка поворота – конкурс на проект Дворца Советов в Москве, который стал переломным в творчестве советских архитекторов: он выявил два принципиально различных подхода – традиционно-монументальный неоклассицизм и функци-

ональный конструктивизм. основополагающие принципы советской архитектуры были заданы в программном докладе ведущего пролетарского культуролога того времени А.В. Луначарского «О задачах пролетарской архитектуры», в котором подчёркивались градостроительный, композиционный, морфологический, функционально-планировочный, стилистический, декоративный и колористический архитектурные критерии.

Согласно А.В. Луначарскому, бывшему одним из лидеров Пролеткульта, Дворец Советов должен был начать новую архитектурную эру. Перед советской архитектурой были поставлены особые градостроительные задачи. Возведение нового типа социалистических городов осуществлялось путём перестройки старых и построения новых – проектирование так называемых «городов при производстве». Была чётко обозначена трёхкомплексная триада: промышленное строительство – жилищное строительство – строительство зданий культурного значения. Практическое строительство в городах во всём своём объёме опиралось на принцип целесообразности с учётом текущего состояния современной техники и социальных потребностей трудящихся масс советского общества. В контексте мировой культуры советская архитектура заявила о себе как о самом передовом искусстве новейшего времени, символизирующем величайшее творческое возрождение и рост мирового трудового коллектива.

Параллельно социалистическое строительство решало целый ряд сложнейших художественно-эстетических задач. Новые здания и архитектурные ансамбли должны были стать актуализацией коллективистических тенденций пролетарской субъектности. Единый трудовой коллектив выступал как родовой субъект, как представитель всего человечества как такового. Родовая пролетарская субъектность своим универсализмом осуществляла диалектическое снятие исторически сложившегося «биоразнообразия» социально-поляризованного человечества, интегрируя отдельные его «виды» (классы, этносы и цивилизации) в единое целое, глобальный метасубъект.

В синтетических архитектурных формах должен был воплотиться дух новой эпохи: активное эмоционально-волевое мироотношение коллективизма, чувство крепкого товарищества и творческого энтузиазма. Механизм прямых и обратных связей не позволял советской архитектурной системе застыть в неоклассических формах: подчёркивалось, что все архитектурные проекты отдельных специалистов-интеллектуалов должны подлежать непрерывной «живой» критике со стороны широких трудящихся масс. Диалектика восхождения от абстрактного к конкретному и от конкретного к абстрактному заключается в дополнительном соотношении этих противоположностей. Поскольку эстетически-абстрактное создаётся через социально-конкретное, то систематическая обратная связь между архитектурой и обществом приносила массу дополнительного идейного материала и свежие импульсы для развития пролетарской архитектуры.

Среди течений зарубежной архитектуры, при наличии которых зарождалась советская архитектура, выделялись две доминирующие тенденции. Первой из них была академическая школа классицизма, которая, как писал А.В. Луначарский, «опираясь на вполне оформившиеся и отчасти даже как бы окостеневшие приёмы строительства», могла «уверенно создавать здания ар-

хитектурно грамотные, привычные для взгляда культурного человека, импонирующие. Несмотря на это, классическая школа подвергалась часто весьма жёстким осуждениям, и ей вменялись в вину её преданность “прошлому”, её “непонимание” того, что вступает в совершенно новую эпоху». В традиционалистской тенденции классической архитектурной школы решать новые возникающие проблемы по-старому усматривали контрреволюционное проявление чуждого классового сознания, отживающей субъектной идентичности. Новое содержание требовало новых форм своего выражения. Подвергался жёсткой критике и псевдоноваторский классицизм, сознательно или бессознательно пытавшийся внедрить в советский архитектурный процесс отдельные формы «той гримасничающей эклектической буржуазной архитектуры, которая развернулась во время полного капиталистического безвкусыя, когда выполнялись причуды миллионеров, заказывавших архитекторам то классику, то готику, то Высокое Возрождение, то барокко. Здесь классика являлась совершенно оторванной в своей общественной связи, делалась мёртвым подражанием» [3, с. 438–447]. Это вполне объективная критика индивидуалистического эклектизма западной архитектуры.

Критиковалось также другое направление зарубежной архитектуры, исходящее из современных достижений инженерии индустриального общества, носящее название функционализма. С точки зрения архитектуры коллективизма это индивидуалистический прагматизм. Архитекторы этой школы, будучи формалистами или чистыми конструктивистами, утверждали, что если здание выполнено технически правильно и в полном соответствии со своей утилитарной функцией, то задача архитектурного оформления уже вполне решена. С позиций советской идеологии здание, таким образом, лишалось своих высоких идейно-эстетических качеств и переставало быть предметом искусства, превращаясь в элемент повседневности на фоне меркантильной среды обитания потребителей, лишённых духа труда и творчества. При этом рекомендовалось не впадать в крайность, когда критики этой инженерии начисто отвергают её, считая, что это просто капиталистическая архитектура и американизм в чистом виде.

А.В. Луначарский формулирует принцип критической ассимиляции западного архитектурного опыта в духе коллективизма. Советская архитектура не должна «пренебрежительно относиться ни к той, ни к другой тенденции», «она должна их вобрать и критически переработать», эклектически не смешивая их при этом и не признавая ни одну из них доминантной. Весь доступный профессиональный опыт, наличные материально-технические ресурсы, все самые передовые способы конструирования, новейшие виды строительных материалов – железо, стекло, железобетон и т. д. – всё это должно всячески учитываться в дальнейшем развитии советской архитектуры, но, комбинируя эти элементы в своём синтезе, она должна творчески оплодотворять их целым рядом новых принципов. Поглощая и усваивая прогрессивный индивидуалистический архитектурный опыт, необходимо перегруппировывать его по образцу и подобию духа коллективизма.

Акцентируются композиционные моменты советского архитектурного стиля. Советской культуре, её творениям должна быть присуща грандиозность. Советские трудящиеся – это синергетическая система людей-сотрудников, ор-

ганизованная миллионголовая масса. Величие и грандиозность общего дела труда и борьбы безусловно должны приводить к архитектурному монументализму, т. е. к тому, чтобы советские здания производили впечатление сверхчеловеческой мощи, выдающейся силы и многозначительности, настолько превосходящей значение отдельных индивидов, насколько превосходит их целостный коллектив. При этом советская архитектура в своих композиционных решениях должна совершенно отказаться от авторитарного наследия прошлого, когда величественные памятники эпохи рабства и аристократии возвышались над человеком, как неприступные бастионы, и совершенно подавляли его психику, формируя чувство безысходности, покорности и смирения перед лицом абсолютной власти и произвола. Наоборот, в архитектуре коллективизма грандиозность и монументальность должны формировать у человека-сотрудника чувство глубокого родства со всем миром, органического соучастия всего и вся в жизни коллективного целого, радостного взаимопонимания и осознанного личного принятия того огромного единства, которое выражается в композиции здания. Поэтому в здании на первом плане должны стоять стройность замысла и высокая организованность его воплощения, гармоничное и взаимодополнительное сочетание частей. Здесь главное – выразить пролетарскую субъектность, коллективистический характер советского народа как миростроителя, создателя гармонически-стройных социальных отношений новой, величайшей эпохи глобальной организованности; именно это и должно отражаться в зданиях советской архитектуры.

Выражаясь современным языком системной методологии, можно сказать, что утверждается принцип доминирования устойчивости над неравновесной динамикой архитектурных форм. Как известно, в архитектуре ушедших эпох постоянно боролись и сменяли друг друга два противоположных принципа – статика и динамика, т. е. принципы устойчивости и подвижности здания. Классическая архитектура – это период господства статики, она создавала впечатление неподвижного стабильного бытия, данного в качестве абсолютной мощи, стойкой силы и вечной красоты. Наоборот, архитекторы барокко и романтизма проектировали здание таким образом, чтобы в нём была видна игра изменчивых и текучих форм, чувствовалось свободное движение линий и плоскостей. Кстати, подобная, но уже многократно усиленная динамика лежит в основе нелинейных форм архитектуры западного постмодернизма. Советские здания в силу своей преемственности по отношению к архитектурной классике должны были поражать именно своей устойчивостью, основа которой уже не обескровленные античные абсолюты, а живая коллективная воля. Но воля коллектива не статична, а динамична. Коллективистическая архитектура – это синтез статики и динамики: морфология советского здания должна выражать динамичное равновесие, устойчивое единство противоположных форм, утверждая в своей функциональности высочайшую жизненность.

Концептуально насыщенный доклад А.В. Луначарского носит ярко выраженный директивный характер. Он был рассчитан на то, чтобы определить мегатренд развития советской архитектуры на целую эпоху. Каждое советское здание должно увеличивать энергию психической системы коллектива: воздействовать своей жизненной красотой и масштабностью, повышать чув-

ственную тональность, внушать удовольствие и радость активной жизни, вызывать бодрое настроение, умножать веру в свои силы и давать огромный психоэнергетический заряд каждому, кто на него смотрит и кто в него входит.

Отсюда вытекает принципиальное колористическое архитектурное решение: чрезвычайная значимость светового и цветового регулирования пространственной среды. В противовес конструктивизму здание советского неоклассицизма должно быть максимально открыто солнцу, поглощать световые лучи, создавая игру света во внутренних помещениях, и отражать его от себя вовне. По афористичному выражению А.В. Луначарского, «свет и социализм так же неразрывно слиты между собой, как тьма и всякое мракобесие господствовавших до сего времени классов». Сложные световые процессы должны быть полностью подчинены архитектурным сверхзадачам единого коллектива. Диалектика солнечного и искусственного света, взаимодействие света и цвета, дополнительное соотношение полихромии и монохромии образуют концептуальное ядро советской архитектурной колористики. В своих цветографических экспериментах советская архитектура не должна создавать, с одной стороны, мрачно чёрных, безрадостных, тусклых, невыразительных, серых или монотонно белых зданий, но, с другой стороны, должна избегать излишне нарядной, «крикливой» и пёстрой цветовой гаммы, характерной для западного рыночного общества. Подбор цвета фасадов зданий и их внутренних пространств должен соответствовать эстетическому идеалу архитектуры коллективизма – величие простоты, проявляющее своё возвышенное содержание в здоровых сдержанных формах, спасительная, организующая мир красота в волнующих красочных одеждах. Рекомендовалось также целесообразно сочетать искусственный свет разных цветов, что открывает широкие возможности варьирования цветовой гаммы здания, оптимально адаптируя его, например, к торжественным похоронным процессиям или массовым праздникам, серьёзным общественным заседаниям или радостным театральным постановкам и т. д.

Далее, согласно фундаментальному докладу А.В. Луначарского, советская архитектура как синтез искусств должна уметь органически включать в себя скульптуру и живопись, при этом избегая бессистемного нагромождения статуй и барельефов и ненужного шаблонного декорирования стен мозаикой или фреской. Произведения пластического искусства в советском здании не должны играть роль внешних бессвязных элементов случайного характера, а складываться в общую архитектурную композицию и порождать органическую результирующую единого здания как гармоничного целого. Это декоративный архитектурный критерий.

И наконец, экономический момент: частная собственность в советском обществе отменена, начат переход к новому, более эффективному способу социальной организации, в связи с чем практическое строительство в стране приобрело масштабный кумулятивный характер. Однако нередко приходилось «осаживать те слишком горячие головы, которые, не проверив новых открытий или новых путей архитектурного оформления, склонны сейчас же навязывать эти свои ещё сомнительные изобретения как несомненный элемент совершенно новой рабочей культуры». Начинать строительство, которое

«будет стоить много миллионов», при крайне сложном политическом и экономическом положении страны было совершенно недопустимо: советские архитекторы не имеют на это «никакого права. Здесь нужна мудрая осторожность и вместе с тем большая открытость всяким подлинно новым шагам» [3, с. 438–447]. В данном случае принцип экономии дополняется принципом целесообразности.

На таких идейных основах формировался новый стиль в советской архитектуре, получивший впоследствии название «сталинский ампир». Определены сверхзадачи архитектуры коллективизма. Происходит кардинальная смена способа восприятия непрерывного архитектурного процесса в СССР, которая непосредственно и знаменует лавинообразный переход к советскому неоклассицизму. Начинается ускорение отечественного архитектурного процесса. Резко обозначаются границы синтетической советской архитектуры. И это не возврат к авторитарной античности, а движение вперёд, пусть даже методом проб и ошибок: согласно парадигме пролетарской культуры, «для пролетариата нечего искать форм искусства в прошедших веках... мы не нуждаемся в эллинском искусстве... Чего ни искал бы художник, всё он может встретить в наше время; в нём такое богатство материала, какого не может дать ни одна эпоха... обращайтесь ваш взор куда угодно, к небу, на Элладу, – нам всё равно, но тогда нам с вами не по дороге» [4, с. 206]. Организация Пролеткульта определила культурные принципы новой эпохи коллективизма.

Конечно, не менее историческим, чем конкурс на проект Дворца Советов, стало специальное совещание по строительству, созванное в ЦК ВКП(б), с участием И.В. Сталина, но оно являлось уже вторичным фактором советского архитектурного процесса. Был отмечен факт расхождения между статичной архитектурной теорией и динамичной строительной практикой: «наш архитектор сплошь и рядом ещё очень плохо связан со строительной практикой, с производством стройматериалов и со строительной площадкой и очень мало озабочен состоянием и нуждами строительного производства... в огромном числе архитектурных проектов никак не отражается современная строительная техника, – они, эти проекты, явно рассчитаны на технику старую, отсталую» [5, с. 1]. С одной стороны, новая эпоха требовала новой архитектуры, с другой стороны, определённо констатировалось, что советские архитекторы опираются на ручной и полуручной труд, «фартук и лопату», игнорируя индустриальные методы. Силы инерции тянули новую эпоху к старой архитектуре.

Что же по старинке делали специалисты-архитекторы? Они ещё только приспособлялись к новым условиям, занимаясь привычным эскизным рисованием и эффектной подачей фасада. Техническая сторона исполнения, а также смета расходов отодвигались на третий план. Качество строительства и внутренняя планировка зданий вообще уходили в минус. В итоге получалось красиво, оригинально, но дорого и некачественно. Решили строить индустриально, стандартно, типично, экономично, в повышенном темпе и качественно, отправив архитектора следить за постройкой лично и ежедневно на лесах. Было заявлено о необходимости оптимально использовать и железобетон, и украшение.

Помимо техники, особенно важна тематика: что конкретно изображает архитектура как зрительный комплекс – мирозерцание советского коллективизма или западного индивидуализма. Соответственно, от направленности художественного переживания зависит и тенденция развития архитектуры – к интеграции или к распаду. Советскую архитектурную парадигму, на каких именно принципах строить здания будущего, сформировали ведущие идеологи пролетарской культуры, поэтому советская архитектура развивалась не «в тени Сталина», как пишут некоторые исследователи (например, Х. Боденшатц [6] или Д.С. Хмельницкий [7]), а в тени Пролеткульта, идеи которого в то время сразу приобрели международный масштаб (Австралия, Австрия, Америка, Англия, Бельгия, Германия, Италия, Канада, Норвегия, Россия, Франция, Чехословакия, Швейцария). В августе 1920 г. было создано Международное Бюро Пролеткульта [8, с. 5]. И хотя в 1932 г. Пролеткульт был закрыт, его идеология продолжала развиваться в новых организационных формах. Именно Пролеткульт породил соцреализм [9, с. 82]. Это объясняется социоисторически. После Октябрьской революции в России к власти пришёл объединённый рабоче-крестьянско-интеллигентский блок, но именно рабочий класс задавал новые формы синергичного жизнеустройства, передовую культуру будущего. Пролеткульт – культурная организация пролетариата как ведущего субъекта советской истории. Поскольку сфера культуры объёмлет сферу политики, то в конечном счёте и В.И. Ленин, и И.В. Сталин, и все советские политические лидеры сознательно или бессознательно руководствовались передовыми идейными наработками идеологов пролетарской культуры. Так, И.В. Сталин поддерживал архитектурные принципы И.В. Жолтовского, следуя В.И. Ленину, которому, в свою очередь, его рекомендовал пролеткультовец А.В. Луначарский: «Горячо рекомендую Вам едва ли не самого выдающегося русского архитектора, приобретшего всероссийское и европейское имя – гражданина Жолтовского... Во всех вопросах, касающихся архитектуры... я очень прошу Вас и вообще Советскую власть обращаться исключительно к нему в качестве советника и эксперта» [10, с. 371–372]. Таким образом, личные архитектурные предпочтения Сталина опять же вырастают из Пролеткульта.

Архитектурная парадигма Пролеткульта – это своего рода единая централистическая литейная форма, с помощью которой по всей стране в духе коллективизма создавалась многообразная, но структурно однородная советская архитектура, её общая конфигурация, внешние контуры и размеры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ле Корбюзье*. Архитектура XX века. Москва : Прогресс, 1977. 303 с.
2. *Бодрийяр Ж.* Архитектура: правда или радикальность? // Социология архитектуры / М. Вильковский. Москва : Фонд «Русский авангард», 2010. С. 389–407.
3. *Луначарский А.В.* Тезисы доклада о задачах пролетарской архитектуры в связи со строительством Дворца Советов // Об искусстве. В 2 томах. Москва : Искусство, 1982. Т. 1. С. 438–447.
4. *Калинин Ф.И.* Диктатура пролетариата в искусстве // XX век и Россия: общество, реформы, революции. Самара, 2018. Вып. 6. С. 202–206.
5. *За удешевление проектирования и строительства.* За высокую культуру стройки. Ко всем членам Союза советских архитекторов СССР // Архитектура СССР. 1936. Январь. С. 1–2.

6. *Боденицц Х.* Градостроительство в тени Сталина. Мир в поисках социалистического города в СССР. 1929–1935. Санкт-Петербург : Verlagshaus Braun / SCIO Media, 2015. 416 с.
7. *Хмельницкий Д.С.* Архитектура Сталина. Психология и стиль. Москва : Прогресс-Традиция, 2006. 376 с.
8. *Международное бюро Пролеткульта* // Пролетарская культура. 1920. № 17–19. С. 5.
9. *Алексеев В.В., Вельм И.М.* Восход и закат Красной Звезды: концепция социально-организованного опыта А.А. Богданова и её роль в становлении советской модели социализма в 1920 – сер. 1930-х гг. Ижевск : ГОУВПО «УдГУ», 2008. 132 с.
10. *Луначарский А.В.* Письмо В.И. Ленину (19 июля 1918 г.) // В.И. Ленин и А.В. Луначарский. Переписка, доклады, документы. Москва : Наука, 1971. С. 371–372.

REFERENCES

1. *Le Corbusier.* Архитектура XX века [Architecture of 20th century]. Moscow: Progress, 1977. 303 p. (rus)
2. *Baudrillard J.* Архитектура: Правда или радикал'ност'? [Architecture: truth or radicality?]. In: Vil'kovskii M. Sotsiologiya arkhitektury [Sociology of architecture]. Moscow: "Russkii avangard", 2010. Pp. 389–407. (rus)
3. *Lunacharskii A.V.* Tezisy doklada o zadachakh proletarskoi arkhitektury v svyazi so stroitel'stvom Dvortsa Sovetov [Theses on proletarian architecture in connection with the construction of Palace of the Soviets], in 2 vol. Moscow: Iskusstvo, 1982. V. 1. Pp. 438–447. (rus)
4. *Kalinin F.I.* Diktatura proletariata v iskusstve [Proletarian dictatorship in art]. In: XX vek I Rossiya: obshchestvo, reformy, revolyutsii, 2018. V. 6. Pp. 202–206. (rus)
5. Za udeshevenie proektirovaniya i stroitel'stva. Za vysokuyu kul'turu stroiki. Ko vsem chlenam Soyuza sovetskikh arkhitektorov SSSR [For cheaper design and building. For the high culture of construction. To all members of the Union of Soviet architects of the USSR]. Архитектура SSSR. 1936. Pp. 1–2. (rus)
6. *Bodenschatz H.* Gradostroitel'stvo v teni Stalina. Mir v poiskakh sotsialisticheskogo goroda v SSSR. 1929–1935 [Urban planning in the shadow of Stalin. The world in search of a socialist city in the USSR. 1929–1935]. Saint-Petersburg: Verlagshaus Braun / SCIO Media, 2015. 416 p. (rus)
7. *Hmel'nikskii D.S.* Архитектура Сталина. Психология и стил' [Architecture of Stalinist period. Psychology and style]. Moscow: Progress-Traditsiya, 2006. 376 p. (rus)
8. *Mezhdunarodnoe byuro Proletkul'ta* [International Bureau of Proletcult]. *Proletarskaya kul'tura.* 1920. No. 17–19. P. 5. (rus)
9. *Alekseev V.V., Vel'm I.M.* Voskhod i zakat Krasnoi Zvezdy: kontseptsiya sotsial'no-organizovannogo opyta A.A. Bogdanova i ee rol' v stanovlenii sovetskoii modeli sotsializma v 1920 – ser. 1930-kh gg [Sunrise and sunset of Krasnoi Zvezdy: socially organized experience of A.A. Bogdanov and its role in formation of the Soviet model in 1920–30s]. Izhevsk, 2008. 132 p. (rus)
10. *Lunacharskii A.V.* Pis'mo V.I. Leninu (19 iyulya 1918 g.) [A letter to V.I. Lenin (July 19, 1918)]. In: V.I. Lenin and A.V. Lunacharskii "Perepiska, doklady, dokumenty" [Correspondence, reports, documents]. Moscow: Nauka, 1971. Pp. 371–372. (rus)

Сведения об авторе

Костова Евгения Викторовна, аспирант, Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств, 630099, г. Новосибирск, Красный проспект, 38, e_kostova@ngs.ru

Author Details

Evgeniya V. Kostova, Research Assistant, Novosibirsk State University of Architecture, Design and Fine Arts, 38, Krasnyi Ave., 630099, Novosibirsk, Russia, e_kostova@ngs.ru

УДК 712.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-19-30

*Э.Э. МАМЕДОВА,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

САДОВО-ПАРКОВАЯ ТЕРРИТОРИЯ УСАДЬБЫ КУПЦА Ф.А. ГОРОХОВА В ТОМСКЕ (СЕРЕДИНА XIX В.)*

Рассматривается историческое формирование садово-парковой территории при усадьбе золотопромышленника Философа Горохова в г. Томске. В середине XIX в. усадебный сад был преобразован в общественно-частный и считался самым привлекательным местом отдыха.

Работа выполнена на основе историко-архитектурного анализа материалов государственных архивов Томской и Омской областей, законодательных и исторических документов, иллюстративных материалов Томского областного краеведческого музея и мемуарной литературы. Проанализированы цели создания и принципы устройства садово-парковой территории при усадьбе Ф.А. Горохова.

В результате дана планировочная характеристика усадебного сада и выполнена графическая реконструкция, соответствующая середине XIX в. Предлагается проводить мероприятия по восстановлению и реконструкции отдельных элементов усадьбы на оставшейся территории.

Ключевые слова: садово-парковая территория; Томск; сад Ф.А. Горохова; усадьба; озеленение; архитектурно-планировочные особенности; функциональное зонирование; графическая реконструкция; восстановление.

Для цитирования: Мамедова Э.Э. Садово-парковая территория усадьбы купца Ф.А. Горохова в Томске (середина XIX в.) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 19–30.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-19-30

*E.E. MAMEDOVA,**Tomsk State University of Architecture and Building*

GARDEN AND PARK TERRITORY OF F.A. GOROKHOV'S MANSION IN TOMSK IN THE MIDDLE OF THE 19th CENTURY

The paper considers the historical formation of the garden and park area at A.F. Gorokhov's mansion, a Tomsk philosopher. In the middle of the 19th century, the manor garden was transformed into a public-private garden and considered to be the most attractive holiday destination. Research is based on the historical and architectural analysis of the materials from the State Archives of the Tomsk and Omsk regions, legislative and historical documents, illustrative materials of the Tomsk Regional Museum of Local Lore and Memories. The analysis is given to the creation and arrangement principles of the garden and park territory of F.A. Gorokhov's mansion. As a result, a planning characteristic of the manor garden and a graphical reconstruction are presented herein for the middle of the 19th century. It is proposed to provide restoration and reconstruction of the mansion elements on the studied territory.

Keywords: garden and park territory; Tomsk; F.A. Gorokhov; mansion; landscaping; architectural and planning; functional zoning; graphic reconstruction; recovery.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-39-90028\20.

For citation: Mamedova E.E. Sadovo-parkovaya territoriya usad"by kuptsa F.A. Gorokhova v Tomske (seredina XIX v.) [Garden and park territory of F.A. Gorokhov's mansion in Tomsk in the middle of the 19th century]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 4. Pp. 19–30.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-19-30

Среди объектов ландшафтной архитектуры особое место занимают исторические садово-парковые территории, которые включают в себя как объекты культурного наследия, так и окружающие их ландшафты. Именно на этих объектах комплексно реализовывалась возможность сочетания архитектурных построек с природным ландшафтом, проведения экспериментов с благоустройством территории, с высадкой разных сортов и видов растений, с организацией увеселительных мероприятий и отдыха для горожан.

Наиболее значимыми объектами озеленения были частные – дворянские усадьбы, которые являлись плодородной почвой, породившей и взрастившей многих выдающихся поэтов, художников, писателей, музыкантов, великих мастеров, имена и произведения которых стали гордостью и достоянием русской нации [1].

Владельцами первых усадебных садов в России были именитые дворяне западной части Российской империи, которые внесли свой вклад в развитие городского озеленения: были созданы уникальные сады с дворцовыми комплексами, городские парки и другие объекты озеленения. Со временем некоторые из них деградировали либо полностью были утрачены. Выявление утраченных садов и причины их запустения позволяют разработать принципы сохранения имеющихся объектов, а также восстановить некоторые из них как объекты исторического культурного наследия. Это является важной задачей в создании комфортной пространственной среды современных городов.

Следует отметить, что усадебному садоводству в России способствовал ряд государственных указов еще в период правления Петра I (1721–1725 гг.) и Екатерины II (1762–1796 гг.). Решения законодательных собраний на местах также способствовали развитию регионального садоводства. Согласно Правительственному Указу 1832 г. разрешалось отводить небольшие участки земли дворянам, купцам, мещанам и др. чинам для разведения на свободных городских землях садов (виноградники), огородов и др. полезных заведений¹. Для городской казны было экономически выгодным продавать или сдавать в аренду свободные участки земли, которые постепенно благоустраивались и озеленялись новыми частными хозяевами.

Вторая четверть XIX в. является важным этапом в озеленении сибирских городов, где стали появляться благоустроенные садово-парковые территории [2, 3]. В этот период произошел значительный рост и развитие отдаленных регионов России: начался процесс формирования регулярной архитектурно-планировочной структуры городов, составленной архитектором В.И. Гесте².

¹ Полное собрание законов Российской империи: Собрание второе (1825–1881). Т. VII, п. IV. Об отдаче городских земель в оброчное содержание для разведения садов. Санкт-Петербург, 1832. С. 915.

² Там же: Собрание первое (1649–1825). Книга чертежей и рисунков (планы городов). Санкт-Петербург, 1859. 416 с.

Вопросы истории формирования озелененных пространств и благоустройства г. Томска рассматриваются в работах Э.К. Майданюка [4], Т.Н. Манониной [5], В.Г. Залесова [6] и др. В губернском городе Томске создание наиболее значимых усадебных частных озеленений приходится на период с 1840-х гг. до начала XX в. [7]. Содержание таких садов в Сибири зависело не только от финансовых возможностей владельцев, но и от климатических условий региона.

Наиболее интересным объектом садово-паркового наследия является усадебный комплекс золотопромышленника Философа Горохова. В середине XIX в. этот усадебный сад считался самым привлекательным местом в городе. Усадьба располагалась в историческом районе Юрточной горы по ул. Почтамской (ныне пр. Ленина), а садово-парковая территория – по ул. Источной. В настоящее время, к сожалению, усадьба разрушена полностью, и мало что сохранилось. Существует предположение, что усадебный дом располагался на месте бывшего здания Общественного собрания (1898). На рис. 1 показаны расположение территории бывшей усадьбы в городе в конце XIX в. и земельный участок, оставшийся в настоящее время.



Рис. 1. Выкопировка из плана губернского г. Томска, 1874 г.: расположение исторической территории сада Ф.А. Горохова; № 23 – здание Общественного собрания (слева). Фрагмент из градостроительного атласа г. Томска, 2020 г.: А – исторические границы усадьбы с садом; Б – оставшийся земельный участок исторической территории (справа)

О семье Гороховых подробно написано в трудах профессора В.П. Бойко [8]. Философ Александрович Горохов (род. в 1797 г.) был сыном Александра Михайловича Горохова (1769–1847), одного из оригинальных и ярких фигур томского чиновничества, городничего и кавалера коллежского асессора. Он сделал блестящую служебную карьеру: начав с мелкой чиновничьей должности канцеляриста в Енисейском уездном суде (1809 г.), закончил Томским губернским прокурором (1833 г.). В 1832 г. женился на дочери тарского купца Евтихия Филимонова – Олимпиаде (1814–1847), которая родила ему девять детей [9].

Вскоре Ф.А. Горохов подал в отставку, уволился с государственной службы и решил заняться предпринимательством по добыче золота³. На золотопромышленности он заработал значительный капитал, а деньги вкладывал в свои увлечения, его страстью было садоводство. Свой талант Ф.А. Горохов начал демонстрировать при устройстве собственного усадебного сада, который со временем был расширен и преобразован в общественно-частный сад для встречи гостей и отдыха горожан.

Неопубликованные ранее новые архивные документы дают ценную информацию о саде Ф.А. Горохова. Из материалов следует, что этот участок земли в черте города был малопригоден под селитебную застройку: место было «глухим» и болотистым, «заведение сада устранило бы эту нечистоту и сохранило бы от ежегодных разливов воды»⁴. После проведения нескольких торгов в 1842 г. городской думой Томска Ф.А. Горохову было отведено место под разведение сада. Участок был обширен и занимал площадь 1720 кв. саж. (более 7800 м²). Имеющиеся в нашем распоряжении материалы позволяют оценить затраты Ф.А. Горохова. Так, только на покупку земельного участка он потратил 250 тыс. царских рублей (в пересчете на золото – около 165 кг шлихового золота). По-видимому, не меньшую сумму предприниматель вложил и в его благоустройство. Такие вложения способствовали созданию уникального сада, которому на то время не было аналогов как в Томске, так и во всей Сибири.

Приобретая эту землю, вероятно, Ф.А. Горохов хотел организовать выход к р. Томи и обеспечить торговые и хозяйственные связи на территории усадеб. По условиям покупки на приобретенной земле нельзя было строить жилье, заводы, фабрики, которые бы «загрязняли атмосферу». За аренду этой земли он должен был внести в городскую думу 70 руб. серебром и 245 руб. ассигнациями. В случае «неоплаты», на основании этого договора, он имел право передать другому лицу или продать приобретенный участок любому гражданину, кроме крепостных людей.

В архивном деле сохранился план местности, на котором четко обозначены контуры планов двух смежных земельных участков, купленных Ф.А. Гороховым (рис. 2). В низине участков протекала речушка Исток, которая разделяла земельные участки на две части. К сожалению, данный картографический материал не позволяет судить о расположении построек.

План построек усадебной и садовой территории в фондах архивов также не был найден, но обнаружен документ 1880 г. о покупке этой земли женой иркутского купца П.Б. Дистлер. Новая хозяйка планировала выстроить на этом участке общественные бани. На чертеже, выданном П.Б. Дистлер, были показаны частично сохранившиеся постройки бывшего сада Горохова (рис. 3). На плане обозначены существующие в то время садовые объекты: двухэтажный флигель, одноэтажные холодные службы, одноэтажный «вокзал» (в то время так назывались павильоны для увеселительных мероприятий), «кегли» (павильон для игры) и одноэтажная беседка. Планом также предусматривались новые предполагаемые

³ Адрианов А.В. Томская Старина. Томские тузы. Горохов // Город Томск. Томск, 1912. С. 77.

⁴ Об отводе Ф.А. Горохову земли под разведение сада, 1842 г. Материал из фондов Государственного архива Омской области (ГАОО).

деревянные строения хозяйки: бани, водоочистительный и сточный колодцы. Если сравнить имеющиеся картографические источники, то можно заметить, что речка Исток имеет узкий проток (рис. 2), а на следующей иллюстрации (рис. 3) она показана полноводной. Совершенно очевидно, что при благоустройстве территории Ф.А. Горохов соорудил плотину, расширил овраг и устроил искусственный пруд с островком для создания задуманного проекта.

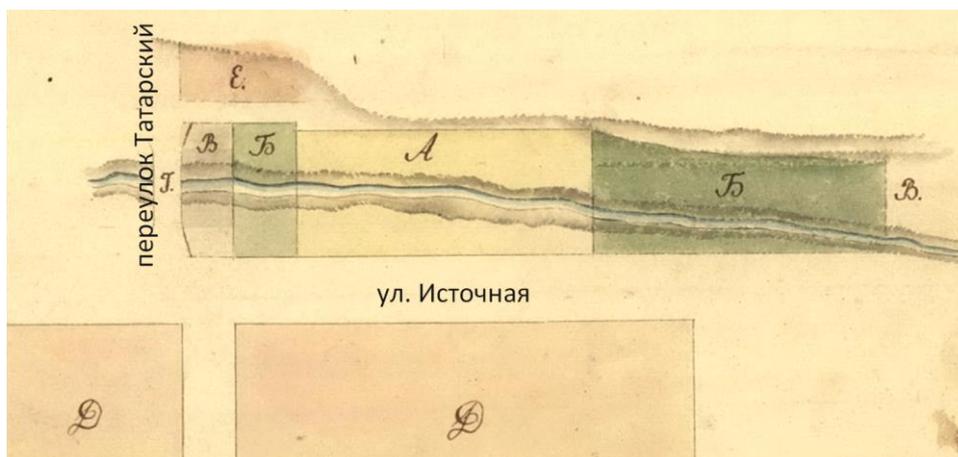


Рис. 2. Торговые листы с проектом условий. План места. Выделенные участки: А – принадлежащая купцу территория; Б – смежные земельные участки; Г – мост; Д – селитебная зона. Из фондов Государственного архива Омской области (ГАОО)

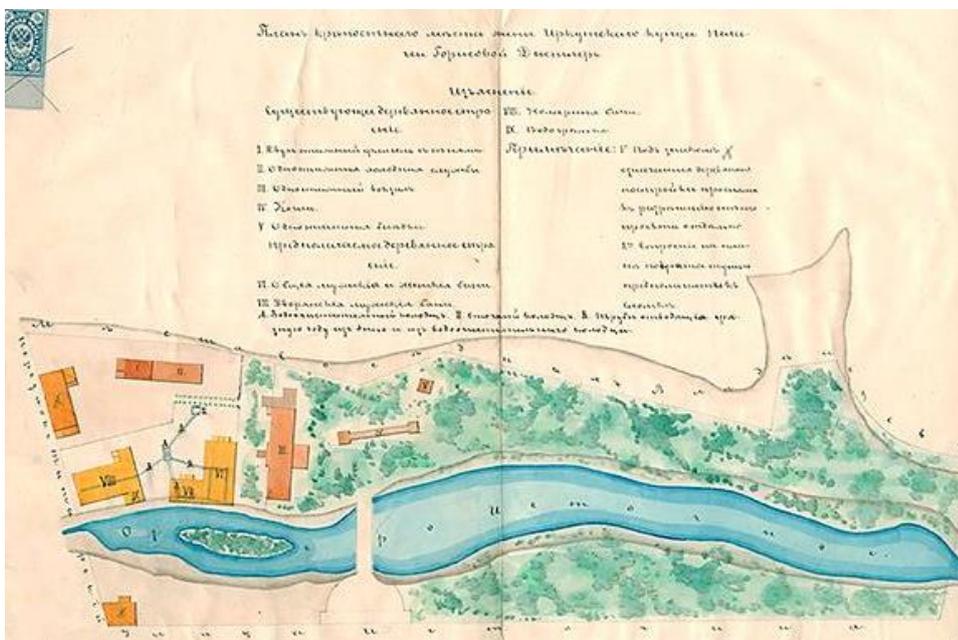


Рис. 3. План места бывшей усадебной территории с садом Ф.А. Горохова, 1880 г. Из фондов Государственного архива Томской области (ГАТО)

Следующим важнейшим материалом можно считать литографию сада Горохова в фондах Томского краеведческого музея (рис. 4). Это единственный иконографический источник середины XIX в., запечатлевший облик усадебного сада. С этого ракурса на изображении можно наблюдать природные особенности местности, архитектурные и скульптурные объекты сада. На переднем плане местность холмистая с естественным природным ландшафтом, здесь же арочный деревянный мост над речкой Исток со скульптурами мифических животных. Видимо, хозяин стремился создать на болотистом месте уникальную территорию с большим садом. Далее, за мостом, организован спуск по лестнице к речке, где могли кататься на гондолах. Справа устроена плотина, которая защищала постройки имения от разливов воды и прочих стихий, а слева, в тихой зоне отдыха, раскинут сад с качелями и островками для рыбалки. На третьем плане над прудом размещался «стеклянный» павильон, расположенный над массивной трехарочной конструкцией, а за ней справа – «вокзал» и на возвышенности, вероятно, усадебный дом. На самом дальнем плане просматривается панорама города, где видно очертание Богоявленского собора. Слева от усадебной территории находятся жилые деревянные дома. Как полагалось в статье историка И.Д. Серебренникова, вероятно, этот рисунок сада был сделан приехавшим в Томск художником П.М. Кошаровым (1824–1902) в 1850 г. [10, с. 50]. Художник создал достаточно четкое графическое произведение в технике тоновой литографии с ровным светом.

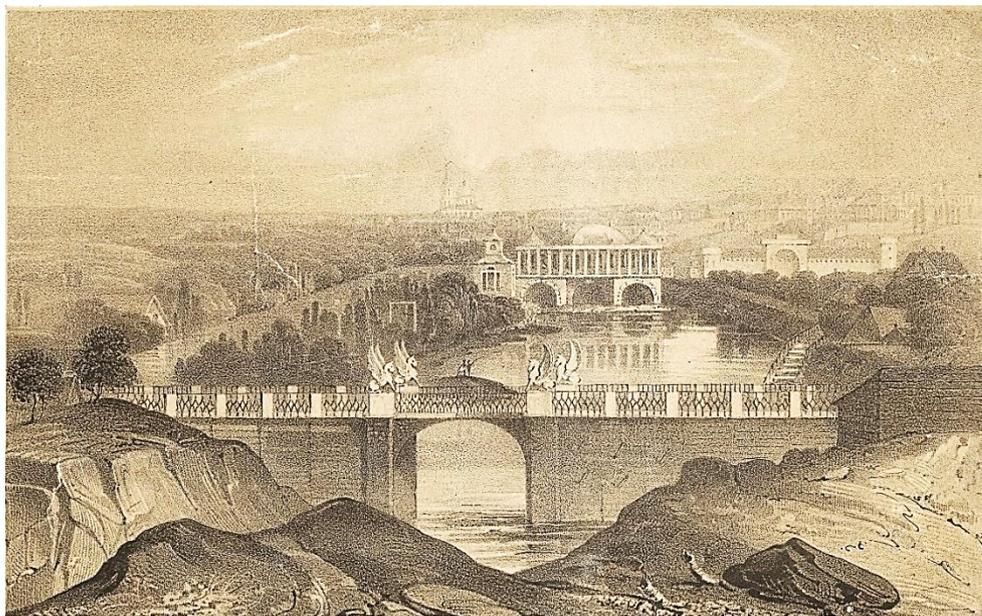


Рис. 4. Литография «Сад Горохова». Из фондов Томского областного краеведческого музея (ТОКМ)

В фондах Томского краеведческого музея также найдена фотография макета сада (рис. 5). Отчетливо видно, что в левой части территории устроена

беседка с оранжереей. Литография и фотография макета сохранились хорошо, но определить видовую принадлежность растений на них невозможно. Поэтому только благодаря мемуарам и воспоминаниям очевидцев можно иметь представление об утерянном саду: информацию о видах садовых насаждений и малых архитектурных формах. Так, в книге К.Н. Евтропова есть следующее описание: «В городе есть прекрасный сад... В этом саду в красивой раме струится светлый и стройный пруд... через него на легких арках перекинута прозрачная танцевальная зала, а по берегам его с одной стороны красуются пестрые цветники, примыкающие к богатой оранжерее, где рдеет виноград, созревают фиги и благоухают роскошные тропические цветы... с другой стороны пруда тянутся аллеи из акаций, тенистые куртины и беседки»⁵.



Рис. 5. Макет «Сад Горохова». Экспозиция музея, зал «Томская губерния в XIX в.». Из фондов Томского областного краеведческого музея (ТОКМ)

Из описаний следует, что сад Ф.А. Горохова был одним из мест отдыха горожан, особенно для людей высшего и среднего сословия. Хозяин радушно принимал своих гостей в праздничные дни, его сад предназначался как для увеселения, так и тихого культурного отдыха и общения с друзьями. Он желал продемонстрировать свое богатство и мировоззренческие вкусы устройством не только самой благоустроенной территории, но и созданием архитектурных объектов, среди которых выделялась оранжерея с экзотическими растениями.

Таким образом, можно отметить, что Ф.А. Горохов показал возможность выращивания разных культур, присущих другим климатическим зонам, в Сибири. Своим творческим подходом по благоустройству и озеленению усадебной территории он привлекал внимание других купцов и состоятель-

⁵ Евтропов К.Н. История Троицкого кафедрального собора в Томске. Глава I. Гороховский сад в 40-х годах XIX века. Томск, 1904. С. 46–47.

ных людей к созданию нечто подобного, тем самым способствовал развитию как частного, так и общественного сада в Томске.

Сад Горохова существовал недолго. В 1845 г. в Томске произошел большой пожар, который истребил многие кварталы незастрахованных строений и, видимо, сильно ухудшил финансовое положение семьи Ф.А. Горохова. Постепенно возрастала доля непроизводственных расходов, связанная не только с поиском и разработкой золотых приисков в отдаленных и труднодоступных местах, но и с расточительным образом жизни компаньонов, прежде всего самого Ф.А. Горохова. В 1847 г. он вступил в число томских купцов первой гильдии, вероятно, для того, чтобы усилить свои позиции в коммерческих кругах, но, превратив свою жизнь в сплошной праздник, делами стал заниматься от случая к случаю. Тем более что расходы на разные его «причуды» превысили разумные даже для крупного капитала пределы, и его предприятие потерпело крах.

После разорения Горохова начинается другая жизнь имения, усадьба пришла в упадок. В 1851 г. земля владельца была распродана по частям купчихе П.Б. Дистлер (рис. 6, А) и купцу И.Д. Асташеву. В 1857 г. большая часть перешла к Общественному собранию: усадебный дом несколько поменял свое функциональное назначение: там проводились лекции, собрания и съезды Общественного собрания⁶, «сад постепенно пришел в упадок и исчез без следа» [10]. Территория усадьбы продолжала функционировать, хотя и не являлась основным общественным местом в городе.

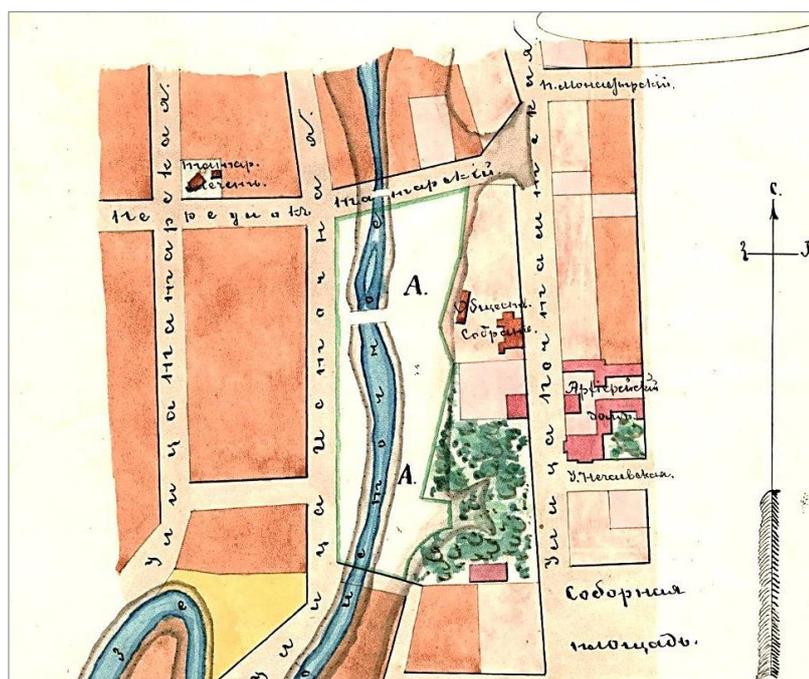


Рис. 6. План бывшей усадьбы Ф.А. Горохова после распродажи, 1851 г. Из фондов Государственного архива Томской области (ГАТО)

⁶ Адрианов А.В. Томская Старина. Томские тузы. Горохов // Город Томск. Томск, 1912. С. 74.

Сведения об усадьбе Ф.А. Горохова немногочисленны, но позволяют воспроизвести графическую реконструкцию планировочной структуры территории и воссоздать архитектурные объекты усадьбы с садом. По имеющейся информации из архивных документов установлено, что территория была разделена на следующие функциональные зоны (рис. 7): с восточной стороны в парадной зоне размещались усадебный дом с флигелем и библиотека (литера А); с западной стороны в садово-парковой зоне (литера Б) – «стеклянный павильон» на мосту, кегельбан, «вокзал», павильон с открытой площадкой-сценой и беседка с оранжереей; с северной и юго-восточной стороны в хозяйственной зоне (литера В) – питомник, хозяйственные корпуса и служебные постройки. С помощью иконографических и картографических, текстовых и других архивных материалов установлено расположение и принципы устройства усадебной территории [11]. По этим сведениям была сделана первая попытка графической реконструкции усадебного сада Ф.А. Горохова, разработана динамическая компьютерная модель данного объекта, которая корректируется с появлением новых архивных материалов (рис. 8).

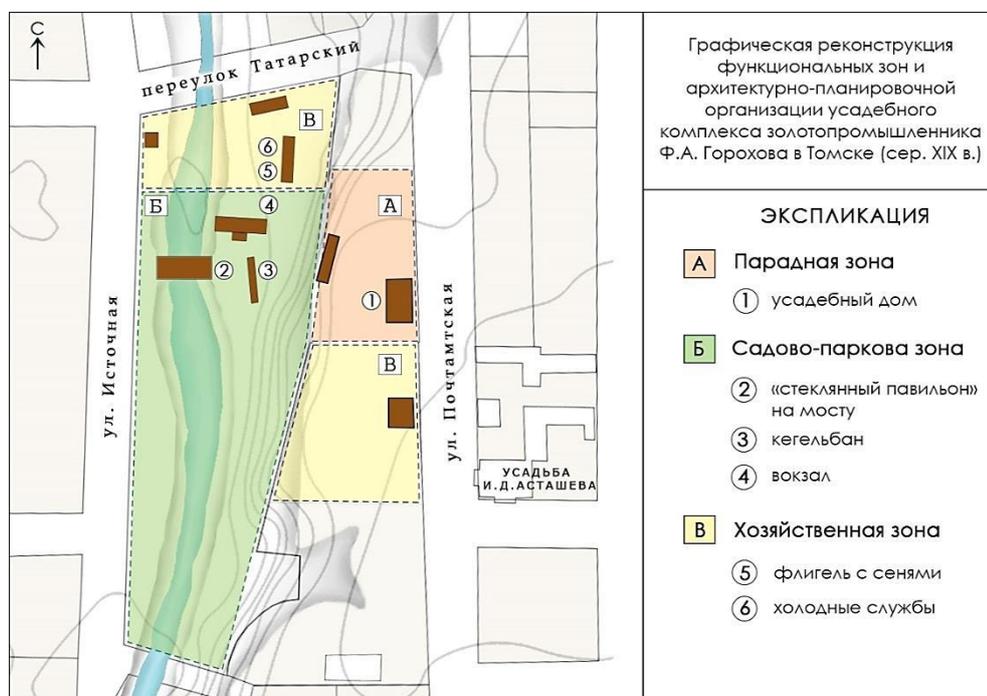


Рис. 7. План-схема усадьбы с садом Ф.А. Горохова в Томске, середина XIX в. Графическая реконструкция Э.Э. Мамедовой

Территория бывшего усадебного сада Ф.А. Горохова занимает особое место в истории ландшафтной архитектуры – это ценная историческая территория середины XIX в. В соответствии с картой градостроительного зонирования Правил землепользования и застройки МО «Город Томск», сохранившаяся территория сада располагается в зоне исторического центра города

и в зоне охраны природного ландшафта. Следовательно, на сохранившемся земельном участке необходимо провести мероприятия, направленные на восстановление отдельных элементов уникального сада: выработать концепцию по благоустройству и озеленению территории и развить рекреационное использование. В полном объеме восстановление исторического сада вряд ли возможно в силу того, что в настоящее время имеется застройка индивидуальными жилыми домами с придомовыми земельными участками, находятся различные коммуникации и хозяйства.



Рис. 8. Сад Ф.А. Горохова. Вид с южной стороны территории. Графическая реконструкция Э.Э. Мамедовой

В настоящее время оставшийся земельный участок сада Ф.А. Горохова принадлежит частному лицу и по назначению является «территорией промышленного пользования». При договоренности с собственником, содействии местной администрации, финансовой и правовой поддержке можно было бы частично воссоздать отдельные объекты некогда существовавшего «Чудо-сада».

Сегодня имеются различные государственные программы и методы по восстановлению исторических объектов ландшафтной архитектуры: проводятся научные реставрационные работы усадебных комплексов, городских садов и парков в центральных городах страны [1, 12]. В свете реализации этих проектов результаты данного исследования могут быть использованы для установления архитектурно-планировочной структуры уникальной усадьбы середины XIX в. и разработки графической модели облика сада усадьбы Ф.А. Горохова. Проведение восстановительных работ, нацеленных на создание парка-музея, позволило бы возродить сад как памятное место с элементами архитектуры и ландшафта того времени. Таким образом, в Томске появи-

лась бы новая благоустроенная территория для отдыха горожан, а также и туристический маршрут, включающий исторические достопримечательности старого Томска.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романова Е.О., Антонова Л.В. Реконструкция усадебных парков // Усадебные парки русской провинции, проблемы сохранения и использования : материалы Всероссийской научной конференции, 9–11 октября 2003 г. Великий Новгород, 2003. С. 160–169.
2. Степанская Т.М. Сад в сибирском городе XIX – начала XX столетий // Современное историческое сибиреведение XVII – начала XX вв. Барнаул: Изд-во «Аз Бука». 2005. С. 323–328.
3. Островская Д.Ю., Пойдина, Т.В. Садово-парковое наследие в сибирском городе в контексте отечественной ландшафтной архитектуры // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. 2014. № 1 (2). С. 164–166.
4. Майданюк Э.К. Сады и парки Томска. Томск : Курсив, 2014. 112 с.
5. Манонина Т.Н. Вклад купцов в благоустройство г. Томска во второй половине XIX – начале XX в. // Вестник Томского государственного университета. 2014. № 388. С. 135–139.
6. Залесов В.Г., Мамедова Э.Э., Манонина Т.Н. Лагерный сад: архитектурно-планировочное формирование городского парка Томска в конце XIX в. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 6. С. 42–58.
7. Мамедова Э.Э., Манонина Т.Н. Архитектурно-планировочное решение коммерческих общественных садов г. Томска // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 2. С. 100–114.
8. Бойко В.П. Первый сибирский олигарх: предпринимательство и образ жизни чиновника и золотопромышленника Ф.А. Горохова // Человек – текст – эпоха : сб. науч. статей и материалов. № 3. Вып. 4: Аналитические практики и перспективы современного источниковедения. Томск : Изд-во Том. гос. ун-та, 2011. С. 249–285.
9. Краткая энциклопедия по истории купечества и коммерции Сибири. Т. 4. Кн. 2. Новосибирск, 1998. С. 58.
10. Серебренников И.Д. Из томской старины. Сад Горохова // Труды Томского краеведческого музея / под ред. М.А. Слободского, М.Б. Шатилова. Томск, 1927. Т. 1. С. 49–52.
11. Мамедова Э.Э. Графическая реконструкция усадьбы с садом Ф.А. Горохова // Избранные доклады IV Международной научной конференции студентов и молодых ученых. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2017. С. 184–188.
12. Сады и парки в России: опыт, проблемы, перспективы. Из истории Царицынского парка: Государственный историко-художественный и ландшафтный музей-заповедник «Царицыно». Москва, 2013. 340 с.

REFERENCES

1. Romanova E.O., Antonova L.V. Rekonstrukcija usadebnyh parkov [Reconstruction of manor parks]. In: Usadebnye parki russkoj provincii, problemi sohraneniya i ispolzovanija: materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii (Proc. 2nd All-Russ. Sci. Conf. 'Manor Parks of Russian Province, Problems of Preservation and Use'). Veliky Novgorod, 2003. Pp. 160–169. (rus)
2. Stepan'skaja T.M. Sad v sibirskom gorode XIX – nachala XX stoletij [Garden in a Siberian city in the 19th and early 20th centuries]. In: Sovremennoe istoricheskoe sibirivedenie XVII – nachala XX vv. Barnaul: Az Buka, 2005. Pp. 323–328. (rus)
3. Ostrovskaja D.J., Pojdina T.V. Sadovo-parkovoe nasledie v sibirskom gorode v kontekste otechestvennoj landshaftnoj arhitektury [Gardening heritage in a Siberian city in the context of Russian landscape architecture]. Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. I.I. Polzunova. 2014. No. 1 (2). Pp. 164–166. (rus)
4. Majdanjuk E.K. Sady i parki Tomsk [Gardens and parks of Tomsk]. Tomsk: Kursiv, 2014. 112 p. (rus)
5. Manonina T.N. Vkladkupcov v blagoustrojstvo g. Tomsk vo vtoroj polovine XIX – nachala XX v. [The contribution of merchants in the improvement of Tomsk late in the 18th and early XX v.].

- 20th centuries]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 388. Pp. 135–139. (rus)
6. Zalesov V.G., Mamedova E.E., Manonina T.N. Lagernyi sad: arkhitekturno-planirovochnoe formirovanie gorodskogo parka Tomsk v kontse XIX v. [Lagerny Park: architecture and planning late in the 19th century]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2019. V. 21. No. 6. Pp. 42–58. (rus)
 7. Mamedova E.E., Manonina T.N. Arkhitekturno-planirovochnoe reshenie kommercheskikh obshchestvennykh sadov g. Tomsk [Architectural and planning concept of commercial public gardens in Tomsk]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018. V. 20. No. 2. Pp. 100–114. (rus)
 8. Bojko V.P. Pervyj sibirskij oligarch predprinimatelstvo i obraz zhizni chinovnika i zolotopromyshlennika F. A. Gorohova [The first Siberian oligarch: entrepreneurship and lifestyle of F.A. Gorokhov, the official and gold miner]. In: Chelovek – tekst – epoha: sb. nauch. statej i materialov. Analiticheskie praktiki i perspektivy sovremennogo istochnikovedenija (*Coll. Papers 'Man - Text – Era'*). 2011. V. 39. No. 4. Pp. 249–285. (rus)
 9. Kratkaja enciklopedija po istorii kupechestva i kommercii Sibiri [A brief encyclopedia on the history of merchants and commerce of Siberia]. Novosibirsk, 1998. V. 4. No. 2. P. 58. (rus)
 10. Serebrennikov I.D. Iztomskojstariny. Sad Gorohova [From Tomsk antiquity. Gorokhov's garden]. In: Trudy Tomskogo kraevedcheskogo muzeja, M.A. Slobodskoi and M.B. Shatilov, Eds., Tomsk, 1927. V. 1. Pp. 49–52. (rus)
 11. Mamedova E.E. Graficheskaja rekonstrukcija usadby s sadom F.A. Gorokhova [Graphic reconstruction of Gorokhov's estate and garden]. *Izbrannye doklady IV Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii studentov i molodyh uchenyh (Proc. 4th Int. Conf. of Young Scientists)*. Tomsk: TSUAB, 2017. Pp. 184–188. (rus)
 12. Sady i parki v Rossii opyt problemy perspektivy. Iz istorii Caricynskogo parka [Gardens and parks in Russia: experience, problems and prospects. From the history of Tsaritsyno Park]. Moscow, 2013. 340 p. (rus)

Сведения об авторе

Мамедова Эльнора Эльдар кызы, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tsuab.univer.tia@gmail.com

Author Details

El'nura E. Mamedova, kzy, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, tsuab.univer.tia@gmail.com

УДК 727.4

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-31-45

*А.К. РЫЛОВА, Е.С. АСТАХОВА,
Академия архитектуры и искусств Южного федерального университета*

АРХИТЕКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ УЧЕБНЫХ ЦЕНТРОВ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПЕРЕПОДГОТОВКИ НА ПРИМЕРЕ Г. РОСТОВА-НА-ДОНУ

Анализируется отечественный и зарубежный опыт проектирования учебных центров профессиональной переподготовки, рассматриваются особенности их архитектуры, дается описание и сравнение трех архитектурных моделей учебных центров и возможности их реализации в структуре города. Актуальность темы исследования определяется следующими факторами: быстрым развитием технологий, приводящим к устареванию и исчезновению некоторых профессий; необходимостью приспосабливаться к быстроменяющимся условиям труда и постоянно совершенствовать свои профессиональные навыки; ростом безработицы вследствие падения экономики в мире и пандемии COVID-19, способствующей поиску новых востребованных профессий.

Целью исследования являются выявление архитектурных особенностей учебных центров и разработка проектных предложений учебного центра профессиональной переподготовки для г. Ростова-на-Дону. Результатом исследования является анализ формообразующих факторов: градостроительных, архитектурно-планировочных, функциональных, психологических и педагогических, и др., влияющих на архитектуру учебных центров профессиональной переподготовки, а также классификация учебных центров по организационной структуре, вместимости, функциональному содержанию, по степени доступности. Предложена концепция учебного центра открытого типа, осуществляющего как профессиональную переподготовку, так и обучающего всех желающих без ограничения возраста, с любым уровнем образования.

Рассмотрены особенности профессиональной переподготовки взрослого контингента обучающихся, включение, кроме традиционных, технических средств обучения и VR-технологий. Предложены архитектурные модели учебных центров: универсального большой и средней вместимости и узкоспециализированного, проведен их сопоставительный анализ, на основе которого произведен выбор самой эффективной модели для г. Ростова-на-Дону.

Ключевые слова: архитектура; архитектурные особенности; учебный центр; профессиональная переподготовка; классификация учебных центров; универсальный учебный центр; узкоспециализированный учебный центр; архитектурные модели; обучение взрослых.

Для цитирования: Рылова А.К., Астахова Е.С. Архитектурные особенности учебных центров профессиональной переподготовки на примере г. Ростова-на-Дону // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 31–45.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-31-45

*A.K. RYLOVA, E.S. ASTAKHOVA,
Southern Federal University*

ARCHITECTURAL STYLE OF PROFESSIONAL DEVELOPMENT CENTERS IN ROSTOV-ON-DON

This article analyzes the Russian and foreign experience of designing training centers, examines the architecture of professional development centers, describes and compares three ar-

chitectural models. The research is determined by the following factors: the rapid development of technologies leading to obsolescence and disappearance of some of professions; need for adaptation to rapidly changing working conditions and constant improvement of professional skills; increase in unemployment due to economic decline in the world and the COVID-19 pandemic which contribute to the search for new, in-demand professions.

The purpose of this work is to analyze the formative factors: town-planning, architectural-planning, functional, psychological and pedagogical, etc., which influence the architecture of professional development centers, their classification according to the organizational structure, capacity, functionality according to the degree of accessibility. The concept of open training center is proposed, which carries out both professional retraining and educates everyone without age restrictions, with any level of education.

Teaching of the adult students is considered, the use of VR technologies along with the traditional technical teaching aids. Architectural models of education centers are proposed: high, medium, and highly specialized capacity, comparative analysis which gives a choice of the most effective model for Rostov-on-Don.

Keywords: architecture; architectural style; training center; professional retraining; classification; highly specialized training center; architectural models; adult education.

For citation: Rylova A.K., Astakhova E.S. Arkhitekturnye osobennosti uchebnykh tsentrov professional'noi perepodgotovki na primere g. Rostova-na-Donu [Architectural style of professional development centers in Rostov-on-Don]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 4. Pp. 31–45.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-31-45

Профессиональная переподготовка – это приобретение новых знаний и навыков, необходимых для получения новой или смежной специальности, совершенствования уже имеющихся профессиональных навыков.

В России курсы профессиональной переподготовки проводят на базе вузов, промышленных предприятий, а также в специализированных учебных центрах. Учебные центры профессиональной переподготовки (УЦПП) не имеют единого архитектурного облика ни в России, ни в мире.

Актуальность темы исследования определяется несколькими факторами. Во-первых, быстрое развитие цифровых технологий приводит к устареванию и исчезновению многих профессий. Повсеместная компьютеризация вынуждает людей устаревающих профессий бросать свою работу. Человек должен быть мобильным и приспосабливаться к быстроизменяющимся условиям труда, постоянно совершенствовать свои профессиональные навыки. В частности, из-за пандемии COVID-19, повлекшей за собой рост безработицы в мире, люди вынуждены менять свою профессию. Профессиональная переподготовка также необходима тем, кто переселяется из сельской местности в город, из периферии в города-мегаполисы. По этим причинам создание нового типа учебных учреждений профессиональной переподготовки очень актуально в наши дни.

В настоящее время почти все учебные центры переподготовки в России являются учреждениями закрытого обслуживания. Они не занимаются популяризацией науки среди всех слоев населения. Например, в учебные центры закрытого типа могут попасть только те, кто записался на программу обучения. Но люди, сомневающиеся в выборе своей деятельности или желающие ознакомиться с новым родом занятий, не могут попасть в здание и просто наблюдать за тем, как учатся другие.

В XXI столетии архитектура учебных комплексов может полностью измениться из-за развития современных коммуникационных технологий. Благодаря повсеместному внедрению технических новинок и систем, итогом преобразований в архитектуре учебных зданий может стать виртуальная архитектура [1]. Но в мире все равно частично сохранится материальная культура учебных заведений, потому что обучение людей некоторым профессиям очень сложно осуществлять только дистанционным способом.

Цель исследования: выявить архитектурные особенности учебных центров и разработать обоснованное проектное предложение учебного центра профессиональной переподготовки на примере Ростова-на-Дону.

На основе проведенного анализа отечественного и зарубежного опыта проектирования учебные центры можно разделить на основные группы:

1) по функциональному содержанию: универсальные, узкоспециализированные;

2) по вместимости: крупные, средние, малые;

3) по степени доступности: «открытый», «полуоткрытый», «закрытый» доступ; учебные центры с визуальной открытостью;

4) по организационной структуре: на базе производства, на базе университета, на базе общественного здания (библиотека, музей), их комбинация (на базе университета и производства, на базе университета и общественного здания) и как самостоятельный объект.

Классификация учебных центров по функциональному содержанию. *Универсальный учебный центр* – это многопрофильное учебное заведение, в котором можно изучать гуманитарные, технические и естественные науки. Такой тип учебного центра может располагаться в крупных городах и в городах-миллионниках. Основные характеристики универсального учебного центра: многофункциональность, многопрофильность, архитектурно-планировочное разнообразие учебных пространств, высокая стоимость строительства и большая площадь застройки.

Ярким примером универсального учебного центра является университет Сколтех, который является четким планировочным ядром в структуре инновационного центра «Сколково» [2]. Университет Сколтех ведет работу в 5 направлениях: энергетика, IT-технологии, биомедицинские технологии, космос, ядерные технологии. Также Сколтех осуществляет не только учебную функцию, но и общественную (медиацентр, проведение бизнес-встреч, мастер-классов, открытых лекций, дискуссий), в вечернее время после занятий можно брать в аренду некоторые помещения.

Узкоспециализированный учебный центр включает в себя одно направление подготовки и может располагаться в любом городе на базе производства, на базе учебного заведения или быть обособленным. Университет Иннополис можно отнести к узкоспециализированным учебным центрам. Иннополис – первый российский город, спроектированный для IT-специалистов в 40 км от Казани. В здании университета совмещены школа и университет, но учебные процессы не пересекаются [3].

Классификация учебных центров по вместимости. Учебные центры профессиональной переподготовки могут различаться по вместимости (табл. 1).

Таблица 1

Описание моделей учебного комплекса профессиональной переподготовки

Характеристики объекта	Универсальный центр профессиональной переподготовки большой вместимости	Универсальный центр профессиональной переподготовки средней вместимости	Узкоспециализированный центр профессиональной переподготовки
1. Расположение в структуре города	В центре города	В центре планировочных районов	В центре планировочных районов или на периферии города
2. Размещение на участке	Отдельно стоящий объект или комплекс зданий на одной территории	Отдельно стоящий объект или комплекс зданий на одной территории	Отдельно стоящий объект или учебный центр в составе уже существующего здания
3. Вместимость центра профессиональной переподготовки, чел.	300–750	150–300	50–150
4. Численность одной учебной группы	От 5 до 25 чел.	От 5 до 15 чел.	От 5 до 15 чел.
5. Количество профессий для переподготовки	30–50	15–30	5–15
6. Доступность для всех слоев населения. Степень «открытости»	Открытого типа Полуоткрытого типа	Открытого типа Полуоткрытого типа	Открытого типа Полуоткрытого типа Закрытого типа

Крупные учебные центры профпереподготовки вместимостью от 300 до 750 чел. включают в себя 30–50 профессий для переподготовки; численность одной учебной группы варьируется от 5 до 25 чел.

Средние учебные центры профпереподготовки вместимостью от 150 до 300 чел. включают в себя 15–30 профессий для переподготовки; численность одной учебной группы варьируется от 5 до 15 чел.

Малые учебные центры профессиональной переподготовки вместимостью от 50 до 150 чел. включают в себя 5–15 профессий для переподготовки и являются чаще всего узкоспециализированными. Численность одной учебной группы варьируется от 5 до 15 чел.

Классификация учебных центров по степени доступности. *Учебный центр с открытым доступом* характеризуется доступностью образования для всех слоев населения. Любой человек может зайти в здание и заглянуть в аудиторию, прослушать лекцию или посетить практические занятия. Открытое образование [4] и беспрепятственный доступ в здание помогут определить-

ся с новой работой тем людям, которые сомневаются в выборе между несколькими профессиями и не знают, какое точно образование хотят получить. «Открытость» образовательного учреждения сгладит социально-экономическое напряжение в стране и позволит получить образование и работу социально незащищенным категориям населения. Также учебный центр открытого доступа может выполнять просветительскую и развлекательную функцию. Например, школьники и студенты могут ознакомиться с разными профессиями, оборудованием и материалами, побывать в мастерских и лабораториях.

Орехово-Зуевский Учебный центр открытого обучения – отечественный пример учебного центра с открытым доступом [5]. Он создавался для профессиональной переподготовки, подготовки, повышения квалификации безработных граждан Московской области. Учебный центр обучает людей без ограничения возраста, с любым уровнем образования. Также существуют *учебные центры с визуальной открытостью* учебного процесса, доступ в здание может быть ограничен, но при этом через большие стеклянные поверхности прохожие на улице могут увидеть деятельность внутри образовательного центра.

Центр науки и инноваций Дж. Боуэна при Университете Джонсона и Уэльса в США иллюстрирует визуальную открытость учебных комплексов. Данный научный центр отличается «открытостью» учебного процесса для горожан. На первом этаже сквозь стеклянные фасады просматриваются учебные аудитории и выставки учебных работ [6].

Учебный центр полуоткрытого доступа имеет частичный доступ в здание для всех людей. Часть аудиторий или корпусов может быть недоступна, это помогает исключить промышленный шпионаж и плагиат, если данный учебный центр скооперирован с промышленным производством и разработкой новых технологий.

Ярким примером учебного центра полуоткрытого доступа является Исследовательская база Jaguar. На первом этаже, в вестибюле, за стеклянной перегородкой можно увидеть главный инженерный зал, но часть зала может закрываться раздвижными перегородками, также часть лабораторий скрыта от глаз посторонних посетителей во избежание воровства технологий производства автомобильной базы [7].

Учебный центр закрытого доступа недоступен для посторонних людей, образование предоставляется только тем, кто является учащимся этого заведения. Многие учебные заведения в России можно отнести к данному типу учебных центров. Человек, который не учится в таком учебном комплексе, может его посетить только во время праздников и торжественных церемоний.

Классификация учебных центров по организационной структуре. *Учебные центры на базе производства* используют площади производственных предприятий. Исследовательская база Jaguar в Великобритании является одним из примеров таких учебных заведений. Чтобы вдвое сократить время, затрачиваемое от идеи до производства, было построено здание, совмещающее производство автомобилей и исследовательскую базу. Здание объединяет Jaguar Land Rover и Европейский технический центр Tata Motors с исследовательским подразделением университета Уорика WMG. Система сотрудниче-

ства производства и научного центра в одном здании позволяет конкурировать с производителями автомобилей BMW или Mercedes.

Биотехнопарк Кольцово в Новосибирске является примером учебного комплекса на базе производства в отечественной практике строительства. Трехэтажное здание Биотехнопарка объединяет в себе производственную и общественную функции, объединенные атриумом. Также в данном научном центре разместились Центр коллективного пользования Биотехнопарка и детский технопарк. Кольцово помогает малым предприятиям выводить на рынок свои разработки в области биотехнологий – это вакцины и лекарственные препараты [8].

Учебные центры на базе университета располагаются внутри университетских зданий или рядом с ними. Так, в Донском государственном техническом университете (ДГТУ) в г. Ростове-на-Дону имеется центр дополнительного образования для взрослых.

Учебные центры могут размещаться на базе общественного здания, используя их площади. Одним из примеров данного типа учебных комплексов является Учебный ресурсный центр Palomar College в США. Данный учебный центр – это современная интерпретация библиотеки. Помимо книжных стеллажей, здесь есть компьютерные классы, репетиторские помещения, учебные комнаты и общественные зоны [9]. Функционально учебный центр делится на 3 основные части: библиотека, академические технологии и репетиторство. Каждая из основных частей здания занимает отдельный этаж.

Также может использоваться *комбинация* нескольких организационных структур. Например, Инновационный центр Tata в университетском кампусе Cornell Tech в США включает в себя 3 основных функциональных блока: университет Cornell Tech, работу различных технологических компаний и израильский Технологический институт [10].

Самостоятельные учебные центры имеют свою площадь для учебной деятельности, могут располагаться отдельным объектом или внутри уже имеющегося здания, работая независимо от других организаций. Частные узкоспециализированные учебные центры чаще всего являются самостоятельными объектами. В Ростове-на-Дону имеется много частных учебных заведений: языковые центры, частные гончарные мастерские, школа архитектурной графики и дизайна Archi.Teach и т. д.

Во время проектирования учебных комплексов профессиональной переподготовки необходимо учитывать следующие *особенности*: градостроительные, архитектурно-планировочные и функциональные особенности; особенности технического оснащения учебных классов, аудиторий и специфику их освещения, психологические и педагогические особенности учебного процесса.

Градостроительные особенности. На основании проведенного исследования существующих учебных центров в Ростове-на-Дону выяснилось, что местные учебные центры профессиональной переподготовки размещаются в разных частях города и в большинстве своем имеют узкую специализацию. Их отличительной особенностью является «закрытость» учебного процесса. Выбор типа учебного центра зависит от специфики и величины города. В городах с развитой промышленностью возможно размещение узкоспециализи-

рованного учебного центра профпереподготовки на базе промышленного производства, например в таких городах, как Сургут, Нижневартовск, в которых осуществляется добыча нефти и газа. Также узкоспециализированный учебный центр может располагаться в малых городах, в которых невозможно строительство дорогостоящих многофункциональных универсальных УЦПП. Для крупных и крупнейших городов более эффективен универсальный учебный центр.

Архитектурно-планировочные и функциональные особенности.

Функциональная организация учебного центра реализуется по системе пространственной организации группы помещений для каждого направления обучения (*профильные секции*) или по системе универсальности использования учебных помещений, а также их комбинации. При организации структуры УЦПП используется вертикальное и горизонтальное зонирование, пространственная локализация предметных секций в отдельных корпусах. Универсальные учебные центры можно делить на секции, соответствующие основным сферам деятельности человека: Природа, Общество, Искусство, Техника, Информация и др. Зонирование учебных и рекреационных зон может подчеркиваться цветом и отделочными материалами для удобства ориентации во внутреннем пространстве (рис. 1).

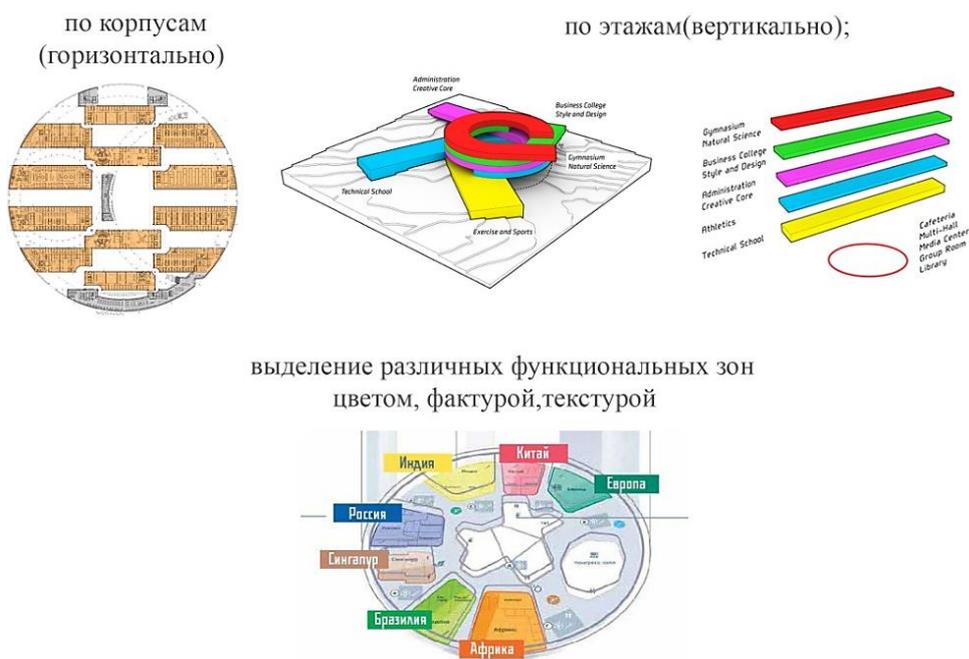


Рис. 1. Выделение основных функциональных зон в объеме здания

Учебное пространство в УЦПП различается по своим характеристикам и функциям, используя как классические кабинеты для теоретических и практических занятий, лаборатории, мастерские, лекционные аудитории,

так и новые формы: тренажерные залы, лаборатории с реальным оборудованием, VR-комнаты для проведения учебных занятий с погружением в виртуальную среду.

Учебные группы в центрах переподготовки варьируются в зависимости от востребованности профессии и в основном небольшие – от 5 до 15 и более человек. Небольшое количество учащихся в группе обусловлено углубленным уровнем обучения профессии и преобладанием индивидуальной работы педагога и учащегося.

Для учебных центров с открытым типом обслуживания обязательно наличие мастерских свободного доступа (фотостудии и студии звукозаписи, швейные мастерские, художественные мастерские, помещения для занятий музыкой и т. д.). Также в составе каждого УЦПП может быть универсальный зал для информационных методов обучения с применением в одном помещении 3D-реальности, голографии, интерактивных информационных стендов, тренажеров-симуляторов. Также в учебном центре может находиться медиатека, совмещенная с обычной библиотекой.

Рекреации в данных учебных центрах могут иметь различные функциональные зоны: зона тихого отдыха, зона общения, зелёные уголки для отдыха, выставочные пространства, информационные зоны с интерактивными стендами, места для индивидуального обучения в специальных кабинках или капсулах, мини-спортивные зоны для активного отдыха после учебной пары.

Форма учебного пространства влияет на характер протекания учебного процесса. Овальные и круглые аудитории способствуют сплочению коллектива и общению. Прямоугольные и квадратные аудитории помогают сконцентрировать внимание на лекторе, экране, доске, на своей работе. Большие и просторные мастерские помогают реализовать творческий потенциал. Мини-кабины для индивидуального обучения ограждают от окружающих людей в рекреации и помогают сконцентрироваться на своей учебе, работе. Частично остекленные аудитории вызывают интерес к процессу, происходящему вовне, способствуя кратковременному снятию напряжения и усталости во время учебы.

Особенности технического оснащения учебных классов и аудиторий. Традиционные технические средства обучения в учебных центрах недостаточны. Одним из современных способов обучения является погружение в виртуальную среду с помощью VR-технологий. Этот способ имеет свои достоинства и недостатки.

Из плюсов данного типа обучения можно назвать следующие: повышение интереса к учебному процессу и облегчение понимания некоторых процессов или явлений (строение атома, процесс пищеварения), погружение в среду без риска для здоровья и больших материальных затрат (виртуальный полёт на самолете, виртуальный химический эксперимент с опасными веществами и т. д.).

К минусам данного способа обучения относятся напряжение зрения из-за динамичной картинки в VR-экранах и, как следствие, ухудшение самочувствия у людей, плохо переносящих длительную работу с электронными источниками информации. Также для многих профессий важна практика именно в реальной жизни.

Виртуальная реальность может симулировать лишь часть процесса, но не весь процесс. Поэтому VR-технологии желательно использовать в качестве дополнительного способа обучения, но не в качестве основного. На данный момент существует 3 типа систем виртуальной реальности: обычная (Virtual Reality – VR), дополненная (Amended Reality – AR) и смешанная реальность (Mixed Reality – MR). Эти технологии быстро развиваются и постепенно вводятся в образовательный процесс различных учебных учреждений [11].

Варианты использования информационных технологий в учебном процессе: 1) погружение в среду с помощью VR-очков; 2) тренажеры-симуляторы; 3) дополненная реальность при помощи компьютера, ноутбука или экрана смартфона; 4) 3D-моделирование и 3D-печать; 5) голограммы; 6) информационные интерактивные стенды в рекреации; 7) совместная работа в виртуальной реальности, пресс-конференции, мастер-классы.

Особенности освещения в учебном пространстве. Требования к естественному освещению учебных помещений едины для разных типов учебных заведений. Планировка кабинетов, аудиторий и лабораторий и размещение в них учебно-технологического оборудования должны обеспечить левостороннее естественное освещение учебной и рабочей поверхности. Смешанное освещение рекомендуется применять в учебных помещениях с большой глубиной (более 8 м). Сочетание бокового и верхнего света создает в помещении нормируемые уровни освещенности. В поле зрительной работы должны отсутствовать световые блики. Допустимые световые контрасты – не более 1:5 (объект восприятия по отношению к фону). Оптимальной ориентацией является восток и юг, для кабинетов черчения, рисунка и скульптуры – север.

Психологические и педагогические особенности. В обучении детей и взрослых имеются существенные различия, связанные с их психологическими и физиологическими особенностями. Если для ребёнка в процессе учебы очень важно получать удовольствие от самого процесса, то для взрослого важна мотивация. Ребёнок не способен планировать свою жизнь на 15–20 лет вперёд, поэтому ему интересны игровые или виртуальные формы подачи информации, а скучные уроки дети игнорируют [12]. Взрослые учатся ради конкретной цели и легче воспринимают сложную информацию.

Дети впитывают информацию «как губка», а взрослые анализируют её на основе своего опыта. Также у взрослых людей есть дефицит времени, поэтому им важно получать качественное обучение в краткие сроки.

В соответствии с психологическими особенностями организации учебного процесса для детей и взрослых по-разному решается и учебное пространство. Если для школьников это групповые занятия в одном классе и кабинетное обучение для старшеклассников, то обучение взрослых реализуется в *профильной секции*. Один и тот же предмет может изучаться в разных помещениях: в аудитории для потоковых лекций, в учебных кабинетах для практических занятий с использованием тренажеров-симуляторов, голографических изображений, аудитории 3D-моделирования и 3D-печати. Процесс обучения взрослых нацелен на получение практических навыков.

Цвет в учебном пространстве соответствует функциональным назначениям помещений, учитывает возрастные предпочтения учащихся и может использоваться как цветовое зонирование здания [13].

В процессе исследования учебных центров были разработаны 3 модели УЦПП (учебных центров профессиональной переподготовки):

- 1) универсальный УЦПП большой вместимости;
- 2) универсальный УЦПП средней вместимости;
- 3) узкоспециализированный центр профессиональной переподготовки.

Модель универсального УЦПП большой вместимости (рис. 2) включает в себя от 30 до 50 направлений для переподготовки. Численность одной учебной группы может варьироваться от 5 до 25 чел. Вместимость учебного центра – от 300 до 750 чел. Расположение в городской структуре – центр города. Система обслуживания открытая (посещение и обучение в учебном заведении доступно любому посетителю). Размещение на участке – отдельно стоящий объект или комплекс зданий на одной территории. Основные направления обучения – «Техника», «Природа», «Творчество», «Общество» и смежные специальности (компьютерные технологии, экология, экономика и т. д.).

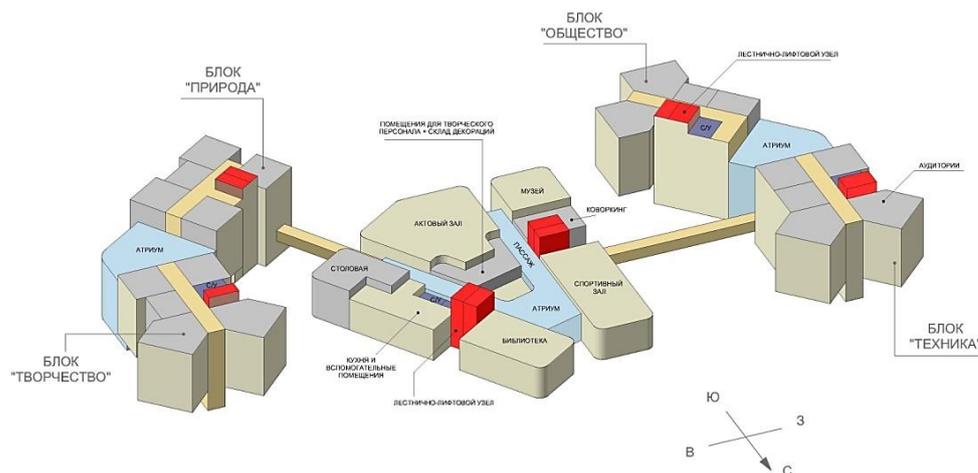


Рис. 2. Модель универсального УЦПП большой вместимости

Для крупнейших городов-миллионеров в России, таких как Москва или Санкт-Петербург, больше всего подходит модель универсального УЦПП большой вместимости.

Модель универсального УЦПП средней вместимости (рис. 3) содержит от 15 до 30 профессиональных направлений. Численность одной учебной группы небольшая – от 5 до 15 чел. Вместимость учебного центра – от 150 до 300 чел. Расположение в городской структуре – в центре города или в центре планировочных районов. Система обслуживания открытая с доступом для всех категорий населения. Размещение на участке – отдельно стоящий объект или комплекс зданий на одной территории. Основные направления обучения – «Техника», «Природа», «Творчество», «Общество» и смежные специальности.

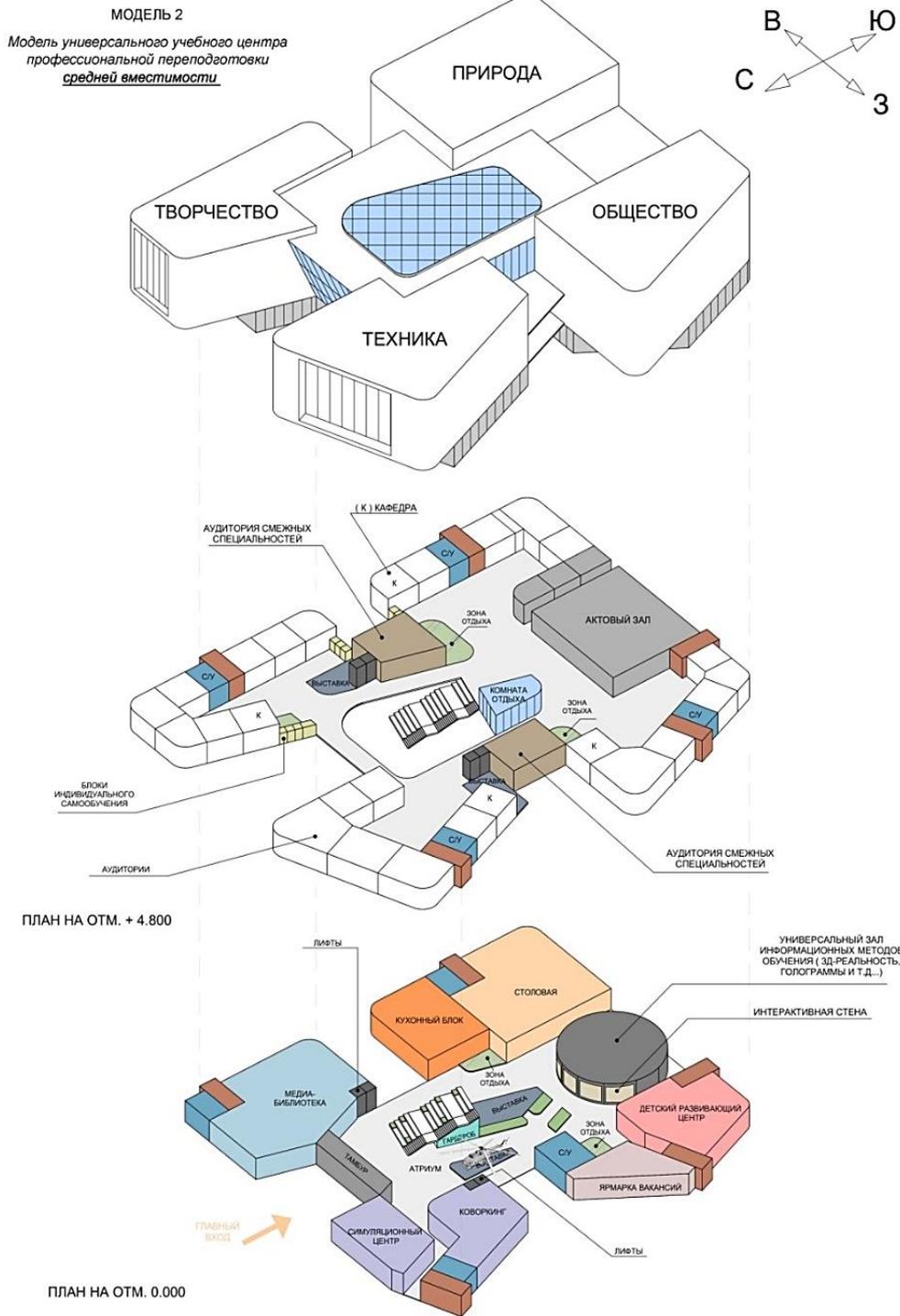


Рис. 3. Модель универсального УЦПП средней вместимости

Модель универсального УЦПП средней вместимости и открытого доступа в здание позволит не просто переучиться на определенную профессию, но и попробовать себя в разных профессиях. Открытый тип учебного комплекса может быть доступным для посещения не только для взрослых, но и для детей и подростков, которые стоят перед выбором будущей профессии и могут ознакомиться с разными направлениями науки.

Универсальный УЦПП средней вместимости для г. Ростова-на-Дону можно разместить на следующих участках:

- 1) УЦПП средней вместимости – на территории бывшего Ростовского ипподрома в центральной части города;
- 2) УЦПП средней вместимости – на территории бывшего аэропорта.

Модель узкоспециализированного центра профессиональной переподготовки (рис. 4) включает в себя небольшое число направлений для переподготовки – от 5 до 15 направлений. Численность одной учебной группы – от 5 до 15 чел. Вместимость учебного центра – от 50 до 150 чел. Расположение в городской структуре – в центре планировочных районов или на периферии города вблизи производства. Система обслуживания – закрытая или полукрытая с частичным доступом для всех слоев населения. Размещение на участке – отдельно стоящий объект или учебный центр в составе существующего предприятия. Имеется только одно узкое направление обучения.

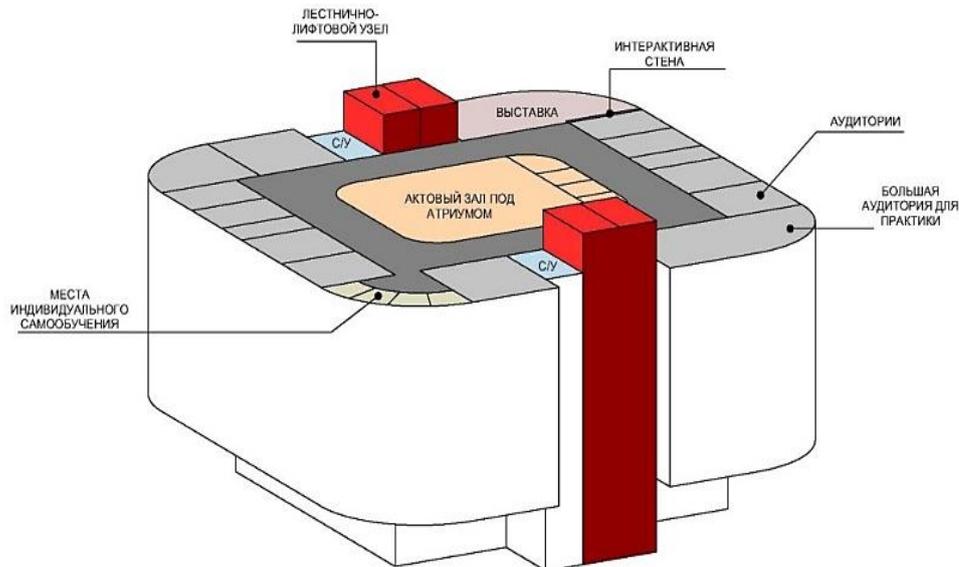


Рис. 4. Модель узкоспециализированного центра профессиональной переподготовки

Потенциальные площадки для размещения узкоспециализированного центра профессиональной переподготовки для г. Ростова-на-Дону:

- 1) узкоспециализированный УЦПП с техническим уклоном на базе ОАО «Роствертол»;

2) узкоспециализированный УЦПП с техническим уклоном на территории бывшего рынка «Привоз», обусловленный близостью к Институту математики, механики и компьютерных наук ЮФУ.

Анализ и сравнение архитектурных моделей УЦПП показал, что самой эффективной для Ростова-на-Дону является модель универсального УЦПП средней вместимости [14]. К основным преимуществам данной модели относятся следующие: открытая система обслуживания (посещать центр и учиться в нем может любой человек); большое число направлений переподготовки, многофункциональность учебного центра (образовательная, культурно-познавательная, развлекательная программы); высокая социальная эффективность для экономики города, более низкая стоимость по сравнению с моделью УЦПП большой вместимости.

Результатом исследования являются выявленные архитектурные особенности, необходимые при проектировании учебных центров профессиональной переподготовки, классификация учебных центров, архитектурные модели УЦПП и их сравнительный анализ.

Выводом являются выявленные архитектурные особенности УЦПП, разработанные архитектурные модели учебных центров профессиональной переподготовки, предложения по их размещению в структуре города и выбор самой эффективной модели учебного центра для г. Ростова-на-Дону.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пабло Кампос Кальво-Сотело*. Архитектура высшего образования: пространственные модели Университета в начале XXI века // Социология власти. 2015. № 3. С. 197–214.
2. *Дизайн-код инновационного центра «Сколково»* // Вестник. Зодчий. 21 век. 2016. № 1. С. 68–71.
3. *Довгая Р.В.* Развитие IT образования в России: на примере университета Иннополис // Российская экономика в условиях современного кризиса: проблемы и пути выхода : сб. тр. конф. Казань, 2016. С. 165–167.
4. *Открытое образование*: участники форума «Открытые инновации» представили модель образования будущего // Внешкольник. 2015. № 1. С. 6–7.
5. *Орехово-Зуевский Учебный центр открытого обучения*. URL: <https://uchebnyj-tsentr-otkrytogo-obuc.webnode.ru/o-nas/> (дата обращения: 15.04.2021).
6. *Maria Francisca Gonzales*. John J. Bowen Center for Science and Innovation at Johnson & Wales University // ArchDaily. 2016. URL: https://www.archdaily.com/925815/john-j-bowen-center-for-science-and-innovation-at-johnson-and-wales-university-architectural-resources-cambridge?ad_medium=gallery (дата обращения: 08.04.2021).
7. *Wilson R., Williams F.* Jaguar's research base: National Automotive Innovation Centre by Cullinan Studio // Architects Journal. 2020. URL: <https://www.architectsjournal.co.uk/buildings/building-study-national-automotive-innovation-centre-by-cullinan-studio> (дата обращения: 11.04.2021).
8. *Кондратенко Е.* Еще один диковинный технопарк : [сайт]. 2015. URL: <https://info.sibnet.ru/article/458359/> (дата обращения 13.04.21).
9. *Pintos P.* Palomar College Learning Resource Center // ArchDaily. 2019. URL: <https://www.archdaily.com/924741/palomar-college-learning-resource-center-lpa> (дата обращения: 12.04.2021).
10. *Tata Innovation Center at Cornell Tech* // Architizer. URL: <https://architizer.com/projects/the-bridge-at-cornell-nyc-tech/> (дата обращения 13.04.21).
11. *Уваров А.Ю.* Технологии виртуальной реальности в образовании // Наука и школа. 2018. № 4. С. 108–117.

12. *Халитова К.Н.* Современные тенденции в сфере образования и их отображение в архитектуре высших учебных заведений // Архитектура и современные информационные технологии. 2018. № 1. С. 121–133.
13. *Иттен И.* Искусство цвета / пер. с нем. и предисл. Л. Монаховой. Москва : Д. Адрионов, 2010. 95 с.
14. *Рылова А.К.* Архитектурные особенности учебных центров профессиональной переподготовки на примере Ростова-на-Дону // Студенческое творчество в архитектурно-художественной культуре России и зарубежья : материалы X Всероссийской науч. конф. / науч. ред. Н.В. Чемерисова. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮФУ, 2020. 392 с.

REFERENCES

1. *Pablo Kampos Kal'vo-Sotelo.* Arkhitektura vysshego obrazovaniya: prostranstvennye modeli Universiteta v nachale XXI veka [Architecture of higher education: university spatial models of the 21st century]. *Sotsiologiya vlasti*. 2015. No. 3. Pp. 197–214. (rus)
2. Dizain-kod innovatsionnogo tsentra “Skolkovo” [Design code of the Skolkovo innovation center]. *Vestnik. Zodchii. 21 vek*. 2016. No. 1. Pp. 68–71. (rus)
3. *Dovgaya R.V.* Razvitie IT obrazovaniya v Rossii: na primere universiteta Innopolis [Development of IT education in Russia: Innopolis University]. In: Rossiiskaya ekonomika v usloviyakh sovremennogo krizisa: problemy i puti vykhoda: Sb. tr. konf. (*Proc. Sci. Conf. ‘Russian Economy in Crisis Conditions: Problems and Ways Out’*). Kazan, 2016. Pp.165–167. (rus)
4. Otkrytoe obrazovanie: uchastniki foruma “Otkrytye innovatsii” predstavili model' obrazovaniya budushchego [Open education: participants of the Open Innovations Forum present the future education model]. *Vneshkol'nik*. 2015. No. 1. Pp. 6–7. (rus)
5. Orekhovo-Zuevskii Uchebnyi tsentr otkrytogo obucheniya [Orekhovo-Zuevsky Open Learning Center]. Available: <https://uchebnyj-tsentr-otkrytogo-obuc.webnode.ru/o-nas/> (accessed April 15, 2021). (rus)
6. *Maria Francisca Gonzales.* John J. Bowen Center for Science and Innovation at Johnson & Wales University. ArchDaily. 2016. Available: www.archdaily.com/925815/john-j-bowen-center-for-science-and-innovation-at-johnson-and-wales-university-architectural-resources-cambridge?ad_medium=gallery (accessed April 8, 2021).
7. *Wilson R., Williams F.* Jaguar’s research base: National Automotive Innovation Centre by Cullinan Studio. Architects Journal. 2020. Available: www.architectsjournal.co.uk/buildings/building-study-national-automotive-innovation-centre-by-cullinan-studio (accessed April 11, 2021).
8. *Kondratenko E.* Eshche odin dikovinnyi tekhnopark [Another outlandish technopark]. 2015. Available: <https://info.sibnet.ru/article/458359/> (accessed April 13, 2021).
9. *Pintos P.* Palomar College Learning Resource Center. ArchDaily. 2019. Available: www.archdaily.com/924741/palomar-college-learning-resource-center-lpa (accessed April 12, 2021).
10. Tata Innovation Center at Cornell Tech. Architizer. Available: <https://architizer.com/projects/the-bridge-at-cornell-nyc-tech/> (accessed April 13, 2021).
11. *Uvarov A.Yu.* Tekhnologii virtual'noi real'nosti v obrazovanii [Virtual reality technologies in education]. *Nauka i shkola*. 2018. No. 4. Pp. 108–117. (rus)
12. *Khalitova K.N.* Sovremennye tendentsii v sfere obrazovaniya i ikh otobrazhenie v arkhitekture vysshikh uchebnykh zavedenii [Modern trends in the field of education and their reflection in the architecture of higher education institutions]. *Arkhitektura i sovremennye informatsionnye tekhnologii*. 2018. No. 1. Pp. 121–133. (rus)
13. *Itten I.* Iskustvo tsveta [The art of color]. Moscow: D. Adronov, 2010, 95 p. (transl. from Germ.)
14. *Rylova A.K.* Arkhitekturnye osobennosti uchebnykh tsentrov professional'noi perepodgotovki na primere Rostova-na-Donu [Architectural features of training centers for professional re-training on the example of Rostov-on-Don]. In: Studencheskoe tvorchestvo v arkhitekturno-khudozhestvennoi kul'ture Rossii i zarubezh'ya: Materialy X Vserossiiskoi nauch. konf. (*Proc. 10th All-Russian Conf. ‘Student Art in Architectural and Artistic Culture in Russia and Abroad’*), N.V. Chemerisova, Ed., Rostov-on-Don, 2020. 392 p. (rus)

Сведения об авторах

Рылова Анастасия Константиновна, магистрант, Академия архитектуры и искусств Южного федерального университета, 344082, г. Ростов-на-Дону, пр. Буденновский, 39, nastuha_rylova@mail.ru

Астахова Елена Степановна, канд. архитектуры, доцент, Академия архитектуры и искусств Южного федерального университета, 344082, г. Ростов-на-Дону, пр. Буденновский, 39, esastahova@sfnedu.ru

Authors Details

Anastasiya K. Rylova, Graduate Student, Southern Federal University, 39, Budennovskii Ave., 344082, Rostov-on-Don, Russia, nastuha_rylova@mail.ru

Elena S. Astakhova, PhD, A/Professor, Southern Federal University, 39, Budennovskii Ave., 344082, Rostov-on-Don, Russia, esastahova@sfnedu.ru

УДК 711.581.03

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-46-56

*А.В. ШУТКА, Е.И. ГУРЬЕВА,
Воронежский государственный технический университет*

ГРАДОСТРОИТЕЛЬНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РЕКРЕАЦИОННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ГОРОДА (НА ПРИМЕРЕ СКВЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО РАЙОНА ГОРОДА ВОРОНЕЖА)

Настоящая статья посвящена вопросу применения современных методов градостроительного проектирования и ландшафтного благоустройства рекреационных территорий современного города.

Рассматриваются особенности и закономерности формирования объемно-пространственной структуры сквера с учетом пространственной организации ландшафта. В статье приводятся основные принципы проектирования рекреационных территорий, основанные на архитектурном ландшафте крупнейшего города.

Разработанные проектные предложения могут служить основой для формирования градостроительной документации, применяться на практике, что способствует успешному социально-экономическому развитию и повышению комфорта проживания населения.

Ключевые слова: сквер; общественное пространство; рекреационные территории; комфортная городская среда; ландшафт; творческие концепции.

Для цитирования: Шутка А.В., Гурьева Е.И. Градостроительная концепция формирования рекреационных территорий города (на примере скверов Железнодорожного района города Воронежа) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 46–56.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-46-56

*A.V. SHUTKA, E.I. GUREVA,
Voronezh State Technical University*

URBAN PLANNING CONCEPT OF RECREATIONAL AREA FORMATION (THE VORONEZH CASE STUDIES)

This article is devoted to the application of modern methods of urban planning for landscape improvement of recreational areas of a modern city.

The formation of the three-dimensional structure of parks is considered with respect to the spatial organization of landscapes. The article presents the basic design principles of recreational areas based on the architectural landscaping in the largest city.

The proposed project can serve as a basis for the formation of urban planning documentation and can be applied in practice. This will contribute to successful socio-economic development and an increase in the living comfort of the population.

Keywords: park; public space; comfortable urban environment; recreational areas; landscape; concepts.

For citation: Shutka A.V., Gureva E.I. Gradostroitel'naya kontseptsiya formirovaniya rekreatsionnykh territorii goroda (na primere skverov Zheleznodorozhnogo raiona goroda Voronezha) [Urban planning concept of recreational area formation (the Voronezh case studies)]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 4. Pp. 46–56.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-46-56

Введение

В настоящее время особую актуальность приобретают рекреационные территории города, которые образуют единую систему и являются важнейшими составляющими комфортной городской среды. Разработка на градостроительном уровне концепции формирования рекреационных пространств является одним из актуальных направлений развития г. Воронежа. Потенциалы рассмотрения тех или иных территорий города, как правило, зависят от их ценностного эквивалента во всех отношениях. В разные годы среди ученых, занимающихся вопросом природного каркаса г. Воронежа, были А.Е. Енин, В.В. Кругляк и др. [1, 2]. В связи с вышесказанным интерес представляет разработка территорий скверов Железнодорожного района города.

Выполненные предложения в данной научно-проектной работе включают следующие разделы задач исследования:

– градостроительный анализ с учетом рекреационных ресурсов территории, оценки транспортно-пешеходного движения, функционального использования, благоустройства и эстетики ландшафтов, выявления проблем [3];

– концепция формирования, в которой определены основные направления развития территории, ее функционального наполнения, ландшафтного благоустройства, стилистические особенности [4];

– проектное предложение, содержащее решение генерального плана, архитектурно-пространственной композиции, средового дизайна и ландшафта [5–7].

Особый интерес представляют следующие объекты исследования Железнодорожного района г. Воронежа (рис. 1, 2).



Рис. 1. Сквер по ул. Панфилова, г. Воронеж

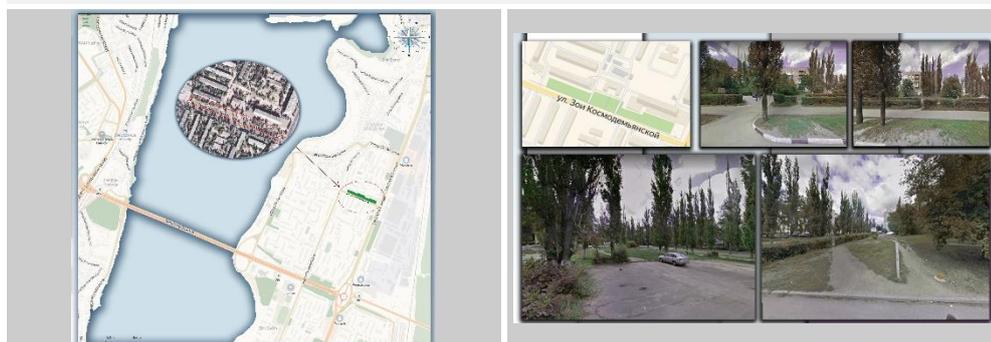


Рис. 2. Сквер по ул. Зои Космодемьянской, г. Воронеж

Исследование предполагало комплексное использование методов ландшафтно-визуального анализа; эстетической оценки, разработку инновации в архитектурный ландшафт города и проработку доступной среды (рис. 3–5).

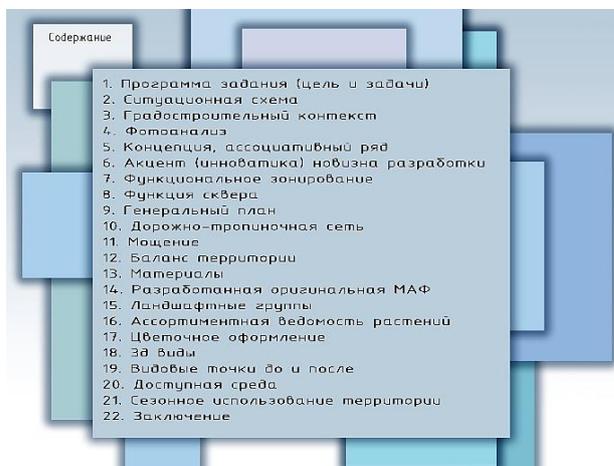


Рис. 3. Градостроительный анализ и программа исследования

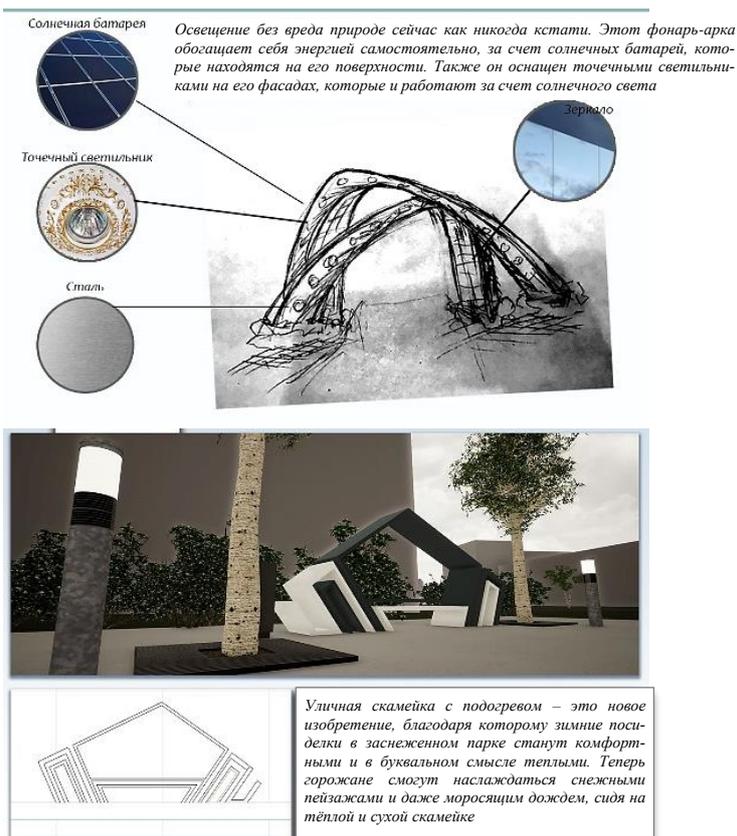


Рис. 4. Инновации в архитектурный ландшафт города



Рис. 5. Доступная среда

Концептуальное предложение

Скверы Железнодорожного района г. Воронежа представляют собой неблагоустроенные, заброшенные территории, требующие ухода и включения их в структуру активно используемых и эксплуатируемых общественных пространств. Концептуальное проектирование ландшафтного благоустройства территорий формирует основные идеи планировочной структуры, архитектурно-художественного содержания, выбора ассортимента растений, пластики земли, обводнения, создания средового дизайна. Территорию городских скверов следует рассматривать как общественное рекреационное многофункциональное пространство. Организация досуга населения, активного и пассивного отдыха необходима, т. к. в условиях городского проживания в связи с высокой скоростью ритма жизни населения увеличиваются и углубляются стрессы. Городские скверы в крупнейших городах являются островками природы, а следовательно, территориями спокойствия и отдыха, релаксации и расслабления, что способствует быстрому восстановлению сил и здоровья горожанина. Ландшафтное благоустройство скверов служит созданию комфортных условий проживания в городской среде (рис. 6, 7).

Концепция благоустройства сквера разрабатывается с целью: формирования архитектурно-художественного и градостроительного своеобразия и идентификации среды; создания комфортных условий проживания в городе; повышения инвестиционной привлекательности рекреационных территорий; внедрения новых технологий; улучшения качества средового дизайна и ландшафтного оформления.



Рис. 6. Концептуальное предложение по скверу по ул. Панфилова Железнодорожного района г. Воронежа. Выполнила студентка 3-го курса М. Щетинина. Руководители: А.Н. Зубцов, Г.М. Величко

Концепция задает тематику, и возможно выделить ассоциативный ряд образов, помогающих раскрыть тему и проработать дизайн архитектурных объектов и ландшафта. При этом важно сохранить существующий ландшафт и зеленые насаждения (рис. 8).



Рис. 7. Концепция сквера Железнодорожного района г. Воронежа. Выполнил студент 3-го курса И. Звягин, Руководители: А.В. Шутка, Е.И. Гурьева

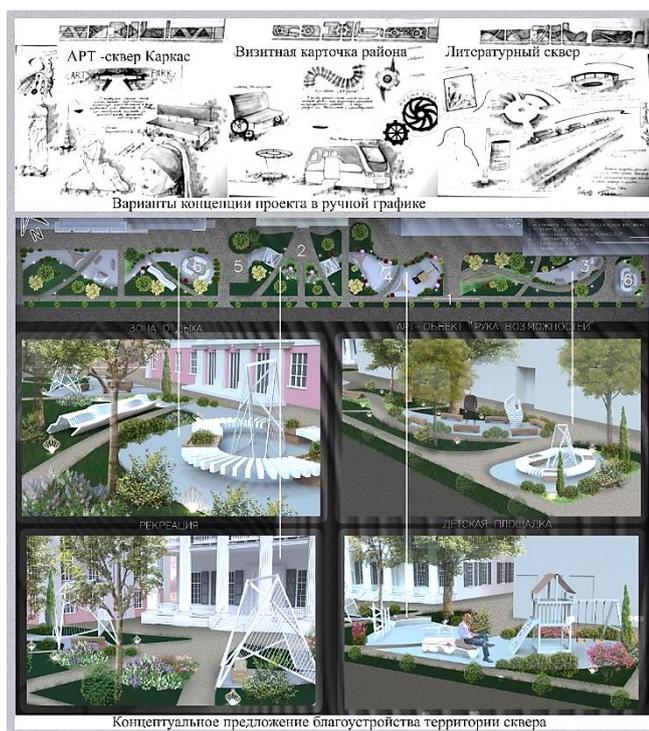


Рис. 8. Концепция сквера Железнодорожного района г. Воронежа. Выполнила студентка 3-го курса А. Прокуратова. Руководители: А.В. Шутка, Е.И. Гурьева

Актуально на уровне концепции проекта определиться с основным стилистическим направлением. Пути движения могут быть в классических архитектурных стилях, или в стиле определенного мастера, или в развитии современных стилей и направлений (рис. 9).



Рис. 9. Концепция сквера Железнодорожного района г. Воронежа. Выполнила студентка 3-го курса А. Бредихина. Руководители: А.Н. Зубцов, Г.М. Величко

Архитектурно-ландшафтная организация скверов как рекреационных территорий города

Проявление концептуального подхода к формированию пространства городского сквера – это объективная необходимость. В процессе реализации концепции решаются задачи ландшафтного благоустройства сквера как целостной организации растений, водных объектов и пластики земли. Важно обеспечить разнообразие открывающихся видов при прогулке по скверу. Современная тенденция создания экосистемы на территории позволяет применять растения, не требующие тщательного ухода и радующие глаз естественной ландшафтно-пейзажной композицией. Ландшафтные группы должны проектироваться с учетом всепогодного ассортимента, обеспечивающего круглогодичное использование.

Принципы проектирования рекреационных территорий города

Формирование скверов на урбанизированных территориях должно отражать современные приемы и методы, тенденции и подходы ландшафтного благоустройства. Скверы Железнодорожного района Воронежа это:

- реальные объекты городской среды;
- объект синтеза архитектуры, искусства и ландшафта;
- пространства для реализации многих функций общественного обслуживания;
- места внедрения современных инновационных технологий, а также достижений науки и техники;
- часть экосистемы городской среды, играющая важную роль для обеспечения экологической устойчивости;
- градостроительные объекты, занимающие определенное положение в городской иерархии общественных рекреационных пространств, где внедряются новые правовые подходы к решению вопросов землепользования;
- объекты инвестиций, новых экономических подходов, для реализации благоустройства территорий которых используются и муниципальные и частные средства.

Скверы классифицируют по различным признакам: конфигурации, размерам, назначению, расположению в градостроительной ситуации, принципам архитектурно-планировочной организации. Интересен художественный подход к формированию среды сквера, направленный на повышение визуальных характеристик, усиление эмоционального насыщения зрелищными элементами, придание информативности пространства. Концепция архитектурно-ландшафтной организации скверов базируется на принципах целостности, гармонизации, целесообразности, выразительности, многофункциональности, единства решения архитектурных объектов и ландшафта.

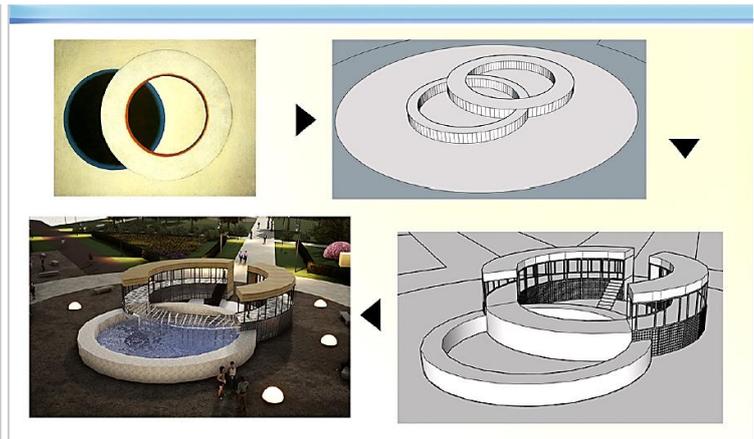
Инновации в архитектурный ландшафт города

Для создания инновационного содержания категории «архитектурного ландшафта» согласно выработанной методологии исследования анализ проводился в двух направлениях: статика (восприятие с одной позиции наблюдения) и динамика (восприятие при последовательной смене позиций наблюдения) визуального восприятия (рис. 10).

Следует обратить внимание на то, что инновации в городскую среду внедряются как архитектурные, так и технологические. Например, умное уличное освещение, которое предполагает использовать освещение объектов исследования:

- фонари, находящиеся под управлением интеллектуальных платформ;
- скамьи с подогревом для зимнего сезонного периода;
- внедрение оригинальных авторских МАФ с флуоресцентным напылением, которые в темное время суток будут выполнять функции подсветки акцентов в скверах;
- уличные воздушно-пузырьковые панели в экстерьере, создающие красивый визуальный эффект.

Создание оригинальной малой архитектурной формы (МАФ)



Вписание в градостроительную ситуацию



Динамичная ландшафтная композиция



Рис. 10. Инновации в архитектурный ландшафт города. Руководитель Е.И. Гурьева

Закономерности формирования ландшафтно-градостроительных систем, выявленные при мониторинге городского ландшафта (с определением новых градостроительных акцентов и определением диссонирующих объектов), позволяют применять инновации в ландшафтной архитектуре для усиления градоформирующей роли природных компонентов зеленого каркаса Воронежа.

Заключение

На основе проведенного исследования сделаны следующие выводы:

1. Концепция является важным и необходимым элементом градостроительного проектирования и разработки проектного предложения.
2. Концептуальное проектирование ландшафтного благоустройства рекреационных территорий дает возможность интересного нетривиального тематического содержания, задает определенный стиль архитектурно-пространственного и композиционно-художественного решения.
3. Разработанные проектные предложения могут служить основой для формирования градостроительной документации, применяться на практике, что способствует успешному социально-экономическому развитию и повышению комфорта проживания населения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кругляк В.В., Гурьева Е.И.* Методологические основы мониторинга системы озеленения (на примере мегаполиса Воронежа) // Международная научная школа «Парадигма». ЛЯТО-2015, Варна, 20–23 августа 2015 г. : сборник научных статей в 8 томах. 2015. С. 70–76.
2. *Енин А.Е., Гурьев А.С.* Общественные пространства города в формировании его колористической структуры // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2020. № 9 (741). С. 118–123.
3. *Шутка А.В., Гурьева Е.И.* Градостроительное проектирование ландшафтов. Основы проектирования ландшафтов: учебное пособие / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». Воронеж : Изд-во ВГТУ, 2020. 77 с.
4. *Шутка А.В., Гурьева Е.И.* Градостроительная оптимизация структуры рекреационных территорий на примере сквера на ул. Депутатская г. Воронеж // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 31–43.
5. *Гурьева Е.И.* Современное состояние зеленых насаждений санаториев Воронежской области // Наука. Мысль. 2014. Т. 4. № 1. С. 20–23.
6. *Гурьева Е.И., Кругляк В.В.* To the issue of renovation of green spaces of sanatorium parks // Наука. Мысль. 2018. Т. 8. № 1. С. 12–28.
7. *Гурьева Е.И., Ульянкина В.А.* Воздействие человеческой деятельности на ландшафт (на примере г. Липецк) // Архитектурные исследования. 2018. № 3 (15). С. 71–80.

REFERENCES

1. *Kruglyak V.V., Gur'eva E.I.* Metodologicheskie osnovy monitoringa sistemy ozeleneniya (na primere megapolisa Voronezha) [Methodological foundations of landscape system monitoring (the Voronezh case studies)]. *Mezhdunarodna nauchna shkola "Paradigma". LYaTO-2015, Varna: sbornik nauchni statii v 8 toma (Coll. Papers "Paradigma"), in 8 vol.* 2015. Pp. 70–76. (rus)
2. *Enin A.E., Gur'ev A.S.* Obshchestvennye prostranstva goroda v formirovanii ego koloristicheskoi struktury [Public spaces and formation of city coloristic structure]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo.* 2020. No. 9 (741). Pp. 118–123. (rus)
3. *Shutka A.V., Gur'eva E.I.* Gradostroitel'noe proektirovanie landshaftov. Osnovy proektirovaniya landshaftov [Urban planning design of landscapes. Fundamentals of landscape design]. *Voronezh, 2020. 77 p.* (rus)

4. *Shutka A.V., Gureva E.I.* Gradostroitel'naya optimizatsiya struktury rekreatsionnykh territorii na primere skvera na ul. Deputatskoi g. Voronezha [Urban optimization of recreation areas in Voronezh park at Deputatskaya street]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 31–43. (rus)
5. *Gureva E.I.* Sovremennoe sostoyanie zelenykh nasazhdenii sanatoriev Voronezhskoi oblasti [Current state of green plantations of sanatoriums of the Voronezh region]. *Nauka. Mysl'*. 2014. V. 4. No. 1. Pp. 20–23. (rus).
6. *Gureva E.I., Kruglyak V.V.* The issue of renovation of green spaces of sanatorium parks. *Nauka. Mysl'*. 2018. V. 8. No. 1. Pp. 12–28. (rus)
7. *Gureva E.I., Ulyankina V.A.* Vozdeistvie chelovecheskoi deyatelnosti na landshaft (na primere g. Lipetsk) [Impact of human activity on the landscape (on the example of Lipetsk)]. *Arkhitekturnye issledovaniya*. 2018. No. 3 (15). Pp. 71–80. (rus)

Сведения об авторах

Шутка Анна Викторовна, канд. архитектуры, доцент, Воронежский государственный технический университет, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, shutka.a@yandex.ru

Гурьева Елена Ивановна, канд. с.-х. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, gurjeva_el@mail.ru

Authors Details

Anna V. Shutka, PhD, A/Professor, Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., Voronezh, Russia shutka.a@yandex.ru

Elena I. Gur'eva, PhD, A/Professor, Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., Voronezh, Russia gurjeva_el@mail.ru

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-57-68

П.А. АКИМОВ¹, Л.С. ЛЯХОВИЧ²,

¹Национальный исследовательский

Московский государственный строительный университет,

²Томский государственный архитектурно-строительный университет

ПРИЦЕЛЬНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СПЕКТРА ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ УПРУГИХ ПЛАСТИН С КОНЕЧНЫМ ЧИСЛОМ СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ МАСС ПУТЁМ ВВЕДЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОБОБЩЁННЫХ СВЯЗЕЙ И ОБОБЩЁННЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Каждая обобщённая прицельная связь *увеличивает* лишь одну выбранную собственную частоту до заранее заданного значения, не изменяя при этом остальные собственные частоты и все формы собственных колебаний. Каждое обобщённое кинематическое устройство *уменьшает* величину лишь одной выбранной собственной частоты до заранее заданного значения, не изменяя при этом остальные собственные частоты и все формы собственных колебаний.

К настоящему времени для некоторых упругих систем с конечным числом степеней свободы масс, у которых *направления движения масс параллельны и лежат в одной плоскости*, разработаны методы создания дополнительных связей и обобщённых кинематических устройств, прицельно изменяющих спектр частот собственных колебаний. В частности, для стержней разработаны теория и алгоритм формирования прицельных дополнительных связей и обобщённых кинематических устройств.

В статье показано, что метод формирования матрицы дополнительных коэффициентов жесткости, характеризующих прицельную связь, и матрицы учета действия дополнительных инерционных сил в задаче о собственных колебаниях стержней может быть применен и при решении аналогичной задачи для упругих систем с конечным числом степеней свободы, у которых *направления движения масс параллельны, но не лежат в одной плоскости*. В частности, к таким системам относятся пластины.

Вместе с тем алгоритмы формирования прицельных дополнительных связей и обобщённых кинематических устройств, разработанные для стержней на основе свойств верёвочных многоугольников, не могут быть без существенных изменений использованы в аналогичной задаче для пластин.

Метод формирования расчётных схем связей и кинематических устройств, прицельно изменяющих спектр частот собственных колебаний упругих пластин с конечным числом степеней свободы масс, представляет собой отдельную задачу и будет рассмотрен в следующей работе.

Ключевые слова: частота собственных колебаний; форма собственных колебаний; обобщённая прицельная дополнительная связь; коэффициенты жесткости; инерционные силы; обобщённое прицельное кинематическое устройство.

Для цитирования: Акимов П.А., Ляхович Л.С. Прицельное регулирование спектра частот собственных колебаний упругих пластин с конечным числом степеней свободы масс путём введения дополнительных обобщённых связей и обобщённых кинематических устройств // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 57–68.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-57-68

P.A. AKIMOV¹, L.S. LYAKHOVICH²,

¹The National Research Moscow State University of Civil Engineering,

²Tomsk State University of Architecture and Building

PRECISION CONTROL FOR EIGEN-FREQUENCY OF ELASTIC PLATES WITH FINITE NUMBER OF MASS DEGREES OF FREEDOM BY USING ADDITIONAL GENERALIZED CONNECTIONS AND KINEMATIC DEVICES

Each generalized precision connection increases only one value of eigen-frequency prior to a specified value, without changing the remaining eigen-frequencies and all natural modes. Each generalized kinematic device reduces only one value of selected eigen-frequency prior to a specified value, without changing the remaining eigen-frequencies and all natural modes.

The methods of creating the additional connections and generalized kinematic devices that precisely change the eigen-frequency are developed for elastic systems with a finite number of degrees of freedom of masses, whose motion directions are parallel and lie in one plane. In particular, the theory and algorithm of formation of additional connections and generalized kinematic devices are developed for rods.

It is shown that the method of forming the matrix of additional stiffness coefficients describing the precision connection and a matrix of the additional inertial forces in the problem of eigen-frequency of rods, can be applied to solve a similar problem for elastic systems with a finite number of degrees of freedom of masses, whose directions of motion are parallel, but do not lie in one plane, in particular plates.

The developed algorithms for the formation of additional precision connections and generalized kinematic devices in rods based on the properties of string polygons cannot be used without significant changes in the similar problem for plates.

The development of connection schemes and kinematic devices that precisely change the eigen-frequency of elastic plates with the finite number of degrees of freedom of masses will be studies in future research.

Keywords: eigen-frequency; natural mode; additional generalized precise connection; stiffness coefficient; inertial forces; generalized kinematic device.

For citation: Akimov P.A., Lyakhovich L.S. Pritsel'noe regulirovanie spektra chastot sobstvennykh kolebaniy uprugikh plastin s konechnym chislom stepenei svobody mass putem vvedeniya dopolnitel'nykh obobshchennykh svyazei i obobshchennykh kinematicheskikh ustroystv [Precision control for eigen-frequency of elastic plates with finite number of mass degrees of freedom by using additional generalized connections and kinematic devices]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 4. Pp. 57–68.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-57-68

При проектировании сооружений в некоторых случаях появляется необходимость вывести одну или несколько собственных частот из опреде-

заранее заданного значения (ω_S) и не изменяющей ни одной из форм собственных колебаний и величин остальных частот спектра. Показано, что создание такой связи основано на формировании матрицы дополнительных коэффициентов жесткости

$$A_0 = A_{SO} \cdot A_S = A_{SO} \|a_0[i, k]\|_{i, k=1}^n, \text{ где } A_S = \|a_0[i, k]\|_{i, k=1}^n. \quad (4)$$

Матрица A_0 должна обладать особыми свойствами. Если вводимая связь «нацелена» на q -ю частоту собственных колебаний, то коэффициенты жесткости $\|a_0[i, k]\|_{i, k=1}^n$ должны быть ортогональны координатам форм собственных колебаний остальных $(n-1)$ частот спектра, т. е.

$$\sum_{k=1}^n a_0[i, k]v[k, j] = 0, \quad (i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, (q-1), (q+1), \dots, n). \quad (5)$$

По отношению к q -й собственной частоте, на которую «нацелена» вводимая связь, коэффициенты не ортогональны, т. е.

$$\sum_{k=1}^n a_0[i, k]v_\omega[k, q] \neq 0, \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (i=1, 2, \dots, n). \quad (6)$$

Показано (например, [2–5]), что условиям (5) и (6) будут удовлетворять коэффициенты

$$a_0[i, k] = m[i]m[k]v_\omega[i, q]v_\omega[k, q]. \quad (7)$$

Величина множителя A_{SO} определяется как корень уравнения

$$\left| (A - \omega_S^2 \cdot M) + A_{SO} \cdot A_S \right| = 0. \quad (8)$$

Так как q -я форма собственных колебаний исходной системы остается собственной формой и после введения прицельной связи, и при частоте ω_S , множитель A_{SO} может находиться как

$$A_{SO} = \frac{-\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (a[i, k] - \omega_S^2 \cdot m[i, k])v_\omega[i, q]v_\omega[k, q]}{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n a_0[i, k]v_\omega[i, q]v_\omega[k, q]}. \quad (9)$$

Результат решения уравнения

$$\left| (A + A_{SO} \cdot A_S) - \omega^2 \cdot M \right| = 0 \quad (10)$$

должен подтвердить, что формы собственных колебаний не изменились, а «прицельная» частота увеличилась до ω_S .

Опорное устройство, которому будет соответствовать матрица дополнительных коэффициентов жесткости A_0 , должно обеспечить соотношение между узловыми перемещениями такое же, как между координатами q -й формы собственных колебаний исходной системы. Показано (см., например,

[2–5]), что такое соотношение будет реализовано, если дополнительная опорная система передаст в узлы основной системы стержня усилия, соотношения между которыми пропорциональны величинам

$$R_0[i] = m[i]v[i, (q)]. \quad (11)$$

Примером такой обобщённой прицельной связи для стержня является шпренгель, очертание которого определяется веревочным многоугольником, построенным в плоскости движения масс по усилиям $R_0[i]$ (см., например, [2–5]).

Такая связь *один раз статически неопределима. Стойки связи установлены в узлах основной системы по направлению движения масс. Предварительное напряжение одного любого стержня вызовет такие усилия в стойках шпренгеля, соотношения между которыми будут такими же, как и соотношения между усилиями $R_0[i]$.*

В настоящей статье рассматривается задача создания прицельных связей для упругих пластин, несущих конечное число сосредоточенных масс. Как и в аналогичной задаче для стержней, предлагается использовать основную систему метода перемещений. Примеры такой пластины и соответствующей ей основной системы метода перемещений приведены на рис. 2, а и б.

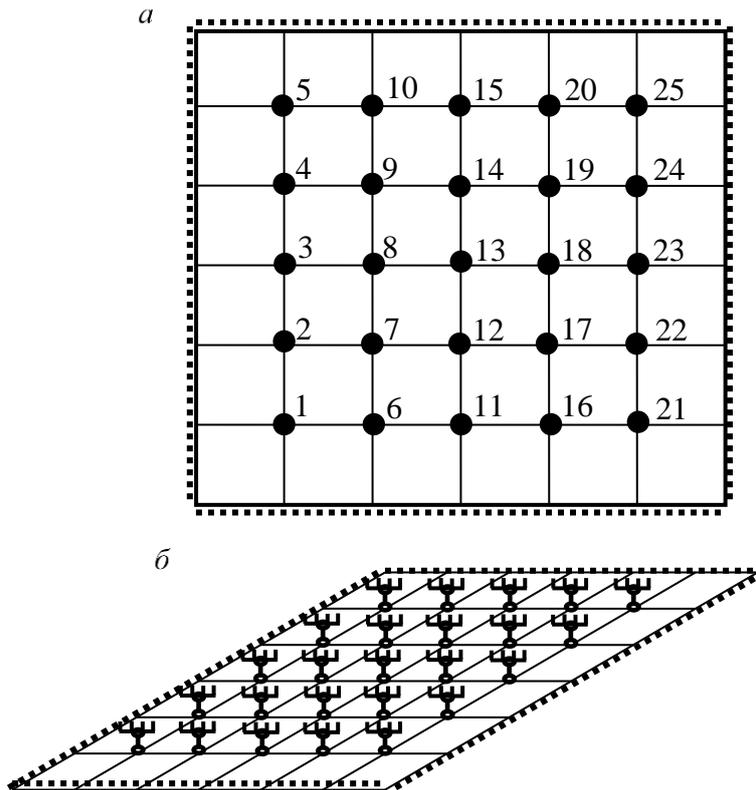


Рис. 2

Если принять в методе перемещений для пластин одномерную нумерацию, то уравнения в этом случае также запишутся в виде (1). Дополнительные связи в основной системе и перемещения $v[k, j]$ в уравнениях отвечают направлению движения масс.

Вывод выражений коэффициентов матрицы дополнительных жесткостей (4) для стержней основан на свойствах форм собственных колебаний.

Так как формы собственных колебаний пластин, так же как и для стержней, ортогональны, т. е.

$$\sum_{k=1}^n m[k] v_{\omega}[k, q] v_{\omega}[k, j] = 0 \quad (q \neq j), \quad (12)$$

то задача для упругих пластин, несущих конечное число сосредоточенных масс, так же как и для стержней, будет основана на формировании матрицы дополнительных коэффициентов жесткости (4). Коэффициенты $\|a_0[i, k]\|_{i, k=1}^n$ также должны удовлетворять условиям (5) и (6) и определяться зависимостями (7).

Приведём пример, подтверждающий, что матрица дополнительных коэффициентов жесткости (4) служит основанием для создания прицельных связей и для упругих пластин, несущих конечное число сосредоточенных масс.

Рассмотрим пластину, несущую 25 сосредоточенных масс (рис. 1, а). В узле 9 величина массы – 600 кг, в узле 18 – 1000 кг, а в остальных узлах – по 800 кг. Размеры пластины в плане 6×6 м, толщина 0,12 м. Модуль упругости материала пластины $E = 24\,000\,000\,000$ н/м². Коэффициент Пуассона $\nu_0 = 0,2$. При основной системе метода перемещений (рис. 2, б) и одномерной нумерации значений $v[k, j]$ в соответствии с рис. 2, а определяется спектр частот собственных колебаний, как корни уравнения (2). Величины первых пяти частот собственных колебаний пластины и координаты соответствующих им собственных форм приведены в табл. 1 (столбцы – начальные частоты и формы).

Таблица 1

ω	Начальные частоты и формы					Изменённые частоты и формы				
	36,6583	91,0084	92,7466	146,834	178,911	91,0084	92,7466	100,00	146,8337	178,911
1	0,0830	0,1995	0,0499	-0,2495	0,1547	-0,1995	-0,0499	0,0830	-0,2495	0,1547
2	0,1434	0,2935	-0,0043	-0,2433	-0,0063	-0,2935	0,0043	0,1434	-0,2433	-0,0063
3	0,1649	0,2568	-0,1468	0,0129	-0,1657	-0,2568	0,1468	0,1649	0,0129	-0,1657
4	0,1420	0,1514	-0,2494	0,2641	-0,0063	-0,1514	0,2494	0,1420	0,2641	-0,0063
5	0,0818	0,0579	-0,1971	0,2624	0,1548	-0,0579	0,1971	0,0818	0,2624	0,1548
6	0,1441	0,2533	0,1398	-0,2517	0,2788	-0,2533	-0,1398	0,1441	-0,2517	0,2788
7	0,2492	0,3484	0,0840	-0,2447	0,0003	-0,3484	-0,0840	0,2492	-0,2447	0,0003
8	0,2867	0,2601	-0,1502	0,0123	-0,2788	-0,2601	0,1502	0,2867	0,0123	-0,2788
9	0,2468	0,1025	-0,3415	0,2593	0,0003	-0,1025	0,3415	0,2468	0,2593	0,0003
10	0,1423	0,0090	-0,2912	0,2642	0,2789	-0,0090	0,2912	0,1423	0,2642	0,2789
11	0,1672	0,1467	0,2455	-0,0058	0,3359	-0,1467	-0,2455	0,1672	-0,0058	0,3359
12	0,2895	0,1491	0,2411	-0,0017	0,0088	-0,1491	-0,2411	0,2895	-0,0017	0,0088

Окончание табл. 1

	Начальные частоты и формы					Изменённые частоты и формы				
13	0,3336	0,0082	-0,0119	0,0070	-0,3237	-0,0082	0,0119	0,3336	0,0070	-0,3237
14	0,2877	-0,1313	-0,2630	0,0124	0,0088	0,1313	0,2630	0,2877	0,0124	0,0088
15	0,1657	-0,1331	-0,2605	0,0131	0,3359	0,1331	0,2605	0,1657	0,0131	0,3359
16	0,1454	0,0007	0,2856	0,2417	0,3025	-0,0007	-0,2856	0,1454	0,2417	0,3025
17	0,2522	-0,0908	0,3339	0,2415	0,0119	0,0908	-0,3339	0,2522	0,2415	0,0119
18	0,2915	-0,2485	0,1317	-0,0018	-0,2941	0,2485	-0,1317	0,2915	-0,0018	-0,2941
19	0,2513	-0,3314	-0,1103	-0,2446	0,0118	0,3314	0,1103	0,2513	-0,2446	0,0118
20	0,1446	-0,2398	-0,1592	-0,2432	0,3025	0,2398	0,1592	0,1446	-0,2432	0,3025
21	0,0842	-0,0528	0,1956	0,2437	0,1811	0,0528	-0,1956	0,0842	0,2437	0,1811
22	0,1461	-0,1445	0,2454	0,2416	0,0151	0,1445	-0,2454	0,1461	0,2416	0,0151
23	0,1688	-0,2486	0,1349	-0,0059	-0,1580	0,2486	-0,1349	0,1688	-0,0059	-0,1580
24	0,1457	-0,2827	-0,0135	-0,2517	0,0151	0,2827	0,0135	0,1457	-0,2517	0,0151
25	0,0838	-0,1910	-0,0633	-0,2494	0,1811	0,1910	0,0633	0,0838	-0,2494	0,1811

Пусть теперь требуется увеличить значение первой частоты собственных колебаний до 100 с^{-1} . Для этого в соответствии с (7), (8), (9) сформируем матрицу дополнительных коэффициентов жесткости. Все данные, необходимые для использования зависимостей (7), (8), (9), приведены в описании пластины и в табл. 1 (столбцы – начальные частоты и формы).

После формирования матрицы дополнительных коэффициентов жесткости с учётом их влияния определяем из уравнения (10) изменённый спектр собственных частот и соответствующие им формы колебаний.

Первые пять собственных частот и соответствующих им форм приведены в табл. 1 (столбцы – изменённые частоты и формы).

Из данных таблицы видно, что учёт дополнительных коэффициентов жесткости не изменил ни одной из форм собственных колебаний пластины, а лишь увеличил значение одной из частот с $36,6583 \text{ с}^{-1}$ до заданной величины 100 с^{-1} . Этот результат наглядно иллюстрирует возможность использования зависимостей (4), (7), (8), (9) и для решения задачи о прицельных связях для упругих пластин с конечным числом степеней свободы масс.

Обобщённая прицельная связь для пластины, так же как и для стержня, должна создавать дополнительную жесткость, обеспечивающую прицельность связи.

Как отмечалось выше, свойства прицельных связей для стержней основаны на свойствах форм собственных колебаний. Используемые при этом свойства относятся и к упругим пластинам. Это обстоятельство служит обоснованием для использования результатов формулирования свойств прицельных связей для стержней и в аналогичной задаче для пластин.

Таким образом, **для упругой пластины с конечным числом степеней свободы масс обобщённой прицельной связи должна соответствовать матрица дополнительных коэффициентов жесткости A_0 (4). Если рас-**

чётная схема связи представлена вариантом шарнирно-стержневой системы, то она должна быть один раз статически неопределима, в узлах пластины, где размещены массы, по направлению движения масс устанавливаются стойки, а предварительное напряжение одного любого элемента связи вызывает такие усилия в стойках системы, соотношения между которыми пропорциональны соотношениям между усилиями $R_0[i]$ (11). При этом в структуре связи не должно быть никаких соединений с пластиной, кроме стоек, установленных в узлах пластины, где размещены массы.

Рассмотрим теперь задачу об обобщенных кинематических устройствах. В [4, 5] для стержней показано, что кинематическое устройство с одной степенью активности передаёт на сооружение обобщенную прицельную инерционную силу, которая уменьшает величину только одной частоты собственных колебаний до заданного значения ω_S , оставляя остальные частоты спектра без изменения. Устройство формируется на основе матрицы учета действия дополнительных инерционных сил:

$$M_0 = M_{m0} \cdot M_m, \text{ где } M_m = \|m_0[i, k]\|_{i, k=1}^n. \quad (13)$$

Матрица M_0 должна обладать особыми свойствами. Если вводимое кинематическое устройство «нацелено» на q -ю частоту собственных колебаний, то коэффициенты матрицы $M_m = \|m_0[i, k]\|_{i, k=1}^n$ должны быть ортогональны координатам форм собственных колебаний остальных частот спектра, т. е.

$$\sum_{k=1}^n m_0[i, k] v_{\omega}[k, j] = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, q-1, q+1, \dots, n). \quad (14)$$

По отношению к q -й частоте собственных колебаний, на которую «нацелено» кинематическое устройство

$$\sum_{k=1}^n m_0[i, k] v[k, q] \neq 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (15)$$

В [4, 5] показано, что условиям (14) и (15) будут удовлетворять коэффициенты

$$m_0[i, k] = m[i] m[k] v_{\omega}[i, q] v_{\omega}[k, q]. \quad (16)$$

Величина множителя M_{m0} находится как корень уравнения

$$\left| (A - \omega_S^2 \cdot M) - M_{m0} (\omega_S^2 \cdot M_m) \right| = 0. \quad (17)$$

Учитывая, что q -я форма собственных колебаний остается собственной формой и при частоте ω_S , множитель M_{m0} может находиться как

$$M_{m0} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (a[i, k] - \omega_S^2 \cdot m[i, k]) v_{\omega}[i, (q)] v_{\omega}[k, (q)]}{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \omega_S^2 \cdot m_0[i, k] v_{\omega}[i, (q)] v_{\omega}[k, (q)]}. \quad (18)$$

Результат решения уравнения

$$\left| A - \omega^2 (M + M_{m0} \cdot M_m) \right| = 0 \quad (19)$$

должен подтвердить, что формы собственных колебаний не изменились, а «прицельная» частота уменьшилась до ω_S .

Кинематическое устройство, которому будет соответствовать матрица коэффициентов учета действия дополнительных инерционных сил $M_0 = M_{m0} \cdot M_m$, где $M_m = \|m_0[i, k]\|_{i, k=1}^n$, должно обеспечить соотношение между узловыми перемещениями такое же, как между координатами q -й формы собственных колебаний исходной системы. В [4, 5] также показано, что такое соотношение будет реализовано, если кинематическое устройство передаст в узлы инерционные силы, соотношения между которыми будут пропорциональны соотношениям между усилиями $R_0[i] = m[i]v_0[i, q]$ (11).

Примером такой обобщённой прицельной кинематической системы для стержня является шпренгель, очертание которого определяется веревочным многоугольником, построенным в плоскости движения масс по усилиям $R_0[i]$ (например, [4, 5]).

Вывод выражений коэффициентов матрицы учета действия дополнительных инерционных сил (13) для стержней основан на использовании метода перемещений в традиционной форме и свойствах форм собственных колебаний.

Так как формы собственных колебаний пластин, так же как и для стержней, ортогональны, то задача для упругих пластин, несущих конечное число сосредоточенных масс, так же как и для стержней, будет основана на формировании матрицы учета действия дополнительных инерционных сил. Коэффициенты $\|m_0[i, k]\|_{i, k=1}^n$ также должны удовлетворять условиям (14) и (15) и определяться зависимостями (16).

На рассмотренном выше примере о собственных колебаниях пластины (см. рис. 2) проведём иллюстрацию формирования матрицы учета действия дополнительных инерционных сил как основу для создания прицельных кинематических устройств и для упругих пластин, несущих конечное число сосредоточенных масс. Данные, характеризующие пластину, приведены выше. Величины первых пяти частот собственных колебаний пластины и координаты соответствующих им собственных форм приведены в табл. 1 (столбцы – начальные частоты и формы).

Допустим, что требуется расширить интервал между четвёртой и пятой частотами собственных колебаний за счёт уменьшения величины четвёртой частоты со $146,834 \text{ с}^{-1}$ до 110 с^{-1} . Для этого в соответствии с (14), (15), (16) сформируем матрицу учета действия дополнительных инерционных сил. Данные, необходимые для использования зависимостей (14), (15), (16), приведены в описании пластины и в табл. 1 (столбцы – начальные частоты и формы).

После формирования матрицы действия дополнительных инерционных сил с учётом их влияния определяем из уравнения (19) изменённый спектр собственных частот и соответствующие им формы колебаний.

Первые пять собственных частот и соответствующих им форм приведены в табл. 2.

Из данных табл. 2 видно, что учёт дополнительных коэффициентов жесткости не изменил ни одной из форм собственных колебаний пластины, а лишь уменьшил значение одной из частот с $146,834 \text{ с}^{-1}$ до заданной величины 110 с^{-1} . Этот результат наглядно иллюстрирует возможность использования зависимостей (14), (15), (16) и для решения задачи об обобщенном кинематическом устройстве связей для упругих пластин с конечным числом степеней свободы масс.

Таблица 2

ω	36,6583	91,0084	92,7466	110,0000	178,9109
1	0,0830	-0,1995	-0,0499	0,2495	-0,1547
2	0,1434	-0,2935	0,0043	0,2433	0,0063
3	0,1649	-0,2568	0,1468	-0,0129	0,1657
4	0,1420	-0,1514	0,2494	-0,2641	0,0063
5	0,0818	-0,0579	0,1971	-0,2624	-0,1548
6	0,1441	-0,2533	-0,1398	0,2517	-0,2788
7	0,2492	-0,3484	-0,0840	0,2447	-0,0003
8	0,2867	-0,2601	0,1502	-0,0123	0,2788
9	0,2468	-0,1025	0,3415	-0,2593	-0,0003
10	0,1423	-0,0090	0,2912	-0,2642	-0,2789
11	0,1672	-0,1467	-0,2455	0,0058	-0,3359
12	0,2895	-0,1491	-0,2411	0,0017	-0,0088
13	0,3336	-0,0082	0,0119	-0,0070	0,3237
14	0,2877	0,1313	0,2630	-0,0124	-0,0088
15	0,1657	0,1331	0,2605	-0,0131	-0,3359
16	0,1454	-0,0007	-0,2856	-0,2417	-0,3025
17	0,2522	0,0908	-0,3339	-0,2415	-0,0119
18	0,2915	0,2485	-0,1317	0,0018	0,2941
19	0,2513	0,3314	0,1103	0,2446	-0,0118
20	0,1446	0,2398	0,1592	0,2432	-0,3025
21	0,0842	0,0528	-0,1956	-0,2437	-0,1811
22	0,1461	0,1445	-0,2454	-0,2416	-0,0151
23	0,1688	0,2486	-0,1349	0,0059	0,1580
24	0,1457	0,2827	0,0135	0,2517	-0,0151
25	0,0838	0,1910	0,0633	0,2494	-0,1811

Обобщённое кинематическое устройство для пластины, так же как и для стержня, должно создавать дополнительную обобщённую инерционную силу, обеспечивающую прицельность действия.

Как отмечалось выше, свойства кинематических устройств для стержней основаны на свойствах форм собственных колебаний. Такие же свойства относятся и к упругим пластинам. Это обстоятельство служит обоснованием

для использования результатов формулирования свойств кинематических устройств для стержней и в аналогичной задаче для пластин.

Таким образом, для упругой пластины с конечным числом степеней свободы масс обобщённому кинематическому устройству должна соответствовать матрица учёта дополнительных инерционных сил M_0 (13). Если расчётная схема связи представлена вариантом шарнирно-стержневой системы, то она должна быть с одной степенью активности, в узлах пластины, где размещены массы, по направлению движения масс устанавливаются стойки, а при колебаниях в стойках системы должны возникать усилия, соотношения между которыми пропорциональны соотношениям между усилиями $R_0[i]$ (11). При этом в структуре связи не должно быть никаких соединений с пластиной, кроме стоек, установленных в узлах пластины, где размещены массы.

Итак, в настоящей статье показано, что метод формирования матрицы дополнительных коэффициентов жесткости, определяющих прицельную связь, и метод формирования матрицы учёта дополнительных инерционных сил, определяющих прицельное кинематическое устройство, в задаче о собственных колебаниях стержней может быть применен и при решении аналогичных задач для упругих систем с конечным числом степеней свободы масс, у которых *направления движения масс параллельны, но не лежат в одной плоскости*.

В статье также обоснованы и сформулированы свойства и требования, которым должны соответствовать расчётные схемы прицельных связей и прицельных кинематических устройств в рассматриваемой задаче.

Расчетные схемы обобщенных прицельных связей и обобщенных кинематических устройств, отвечающие приведенным выше требованиям, многовариантны и зависят от очертания пластины, мест расположения масс и некоторых других особенностей исходного объекта. С учетом этих обстоятельств подходы и алгоритмы формирования соответствующих расчётных схем, прицельно изменяющих спектр частот собственных колебаний упругих пластин с конечным числом степеней свободы масс, представляют отдельную задачу и будут рассмотрены в следующей работе.

Основные результаты статьи представлены также в англоязычном варианте в [6 и 7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нудельман Я.Л. Методы определения собственных частот и критических сил для стержневых систем. Москва : Гостехиздат, 1949. С. 175.
2. Нудельман Я.Л., Ляхович Л.С., Гитерман Д.М. О наиболее податливых связях наибольшей жесткости // Вопросы прикладной механики и математики. Томск : Изд-во ТГУ, 1981. С. 113–126.
3. Гитерман Д.М., Ляхович Л.С., Нудельман Я.Л. Алгоритм создания резонансно-безопасных зон при помощи наложения дополнительных связей // Динамика и прочность машин. Вып. 39. Харьков : Вища школа, 1984. С. 63–69.
4. Ляхович Л.С., Малеткин О.Ю. О прицельном регулировании собственных частот упругих систем // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1990. № 1. С. 113–117.
5. Ляхович Л.С. Особые свойства оптимальных систем и основные направления их реализации в методах расчета сооружений. Томск : Изд-во Том. гос. арх.-строит. ун-та, 2009. 372 с.

6. *Lyakhovich L.S., Akimov P.A.* Aimed control of the frequency spectrum of eigenvibrations of elastic plates with a finite number of degrees of freedom of masses by superimposing additional constraints. // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. V. 17. I. 2. P. 76–82.
7. *Akimov P.A., Lyakhovich L.S.* Aimed control of the frequency spectrum of eigenvibrations of elastic plates with a finite number of degrees of mass freedom by introducing additional generalized kinematic devices. // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. V. 17. I. 3. P. 14–20.

REFERENCES

1. *Nudel'man Ya.L.* Metody opredeleniya sobstvennykh chastot i kriticheskikh sil dlya sterzhnevyykh sistem [Determination of eigen-frequencies and critical forces for rod systems]. Moscow: Gostekhizdat, 1949. 175 p. (rus)
2. *Nudel'man Ya.L., Lyakhovich L.S., Giterman D.M.* O naibolee podatlivykh svyazyakh naibol'shei zhestkosti [Most ductile connections of the greatest rigidity]. In: *Voprosy prikladnoi mekhaniki i matematiki*. Tomsk: TSU, 1981. Pp. 113–126. (rus)
3. *Giterman D.M., Lyakhovich L.S., Nudel'man Ya.L.* Algoritm sozdaniya rezonansno-bezopasnykh zon pri pomoshchi nalozheniya dopolnitel'nykh svyazei [Algorithm for creating resonance-safe zones by applying additional connections]. In: *Dinamika i prochnost' mashin*, vol. 39. Khar'kov: Vishcha shkola, 1984. Pp. 63–69. (rus)
4. *Lyakhovich L.S., Maletkin O.Yu.* O pritsel'nom regulirovanii sobstvennykh chastot uprugikh sistem [Precise analysis of eigen-frequencies of elastic systems]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1990. No. 1. Pp. 113–117. (rus)
5. *Lyakhovich L.S.* Osobyie svoistva optimal'nykh sistem i osnovnye napravleniya ikh realizatsii v metodakh rascheta sooruzhenii [Specific properties of optimum systems and their use in structural analysis]. Tomsk: TSUAB, 2009. 372 p. (rus)
6. *Lyakhovich L.S., Akimov P.A.* Aimed control of the frequency spectrum of eigenvibrations of elastic plates with a finite number of degrees of freedom of masses by superimposing additional constraints. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. V. 17. No. 2. Pp. 76–82.
7. *Akimov P.A., Lyakhovich L.S.* Aimed control of the frequency spectrum of eigenvibrations of elastic plates with a finite number of degrees of mass freedom by introducing additional generalized kinematic devices. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. V. 17. No. 3. Pp. 14–20.

Сведения об авторах

Акимов Павел Алексеевич, докт. техн. наук, академик РААСН, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, pavel.akimov@gmail.com, AkimovPA@mgsu.ru

Ляхович Леонид Семенович, докт. техн. наук, академик РААСН, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, lls@tsuab.ru, lsl@sibmail.com

Authors Details

Pavel A. Akimov, DSc, Professor, Academician RAACS, The National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, pavel.akimov@gmail.com, AkimovPA@mgsu.ru

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

УДК 624.074.4

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-69-78

Т.А. ТРЕПУТНЕВА, М.О. МОИСЕЕНКО, О.Н. ПОПОВ,
В.Н. БАРАШКОВ, Д.Н. ПЕСЦОВ,
Томский государственный архитектурно-строительный университет

НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОДКРЕПЛЁННЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Наиболее распространенными конструкциями, предназначенными для установки технологического оборудования в цехах, являются балочные площадки, монтируемые из стального проката и листовых элементов. Значения величин перемещений и напряжений ребристых пластин, полученные по линейной теории, существенно отличаются от величин, полученных с учётом физической и геометрической нелинейностей.

Совместный учёт двойной нелинейности значительно уточняет математическую модель подкреплённых гибких пластин и оболочек, что позволяет получить более полное представление о напряжённо-деформированном состоянии конструкции.

В статье представлен алгоритм расчёта гибких подкреплённых ребром пластин и пологих оболочек, основанный на применении энергетического функционала Лагранжа. Исследуется напряжённо-деформированное состояние пластины, подкреплённой симметрично ребром жесткости, нагруженной равномерно распределённой нагрузкой.

Ключевые слова: подкреплённые пластины; напряжённо-деформированное состояние; физическая и геометрическая нелинейности.

Для цитирования: Трепутнева Т.А., Моисеенко М.О., Попов О.Н., Барашков В.Н., Песцов Д.Н. Напряжённо-деформированное состояние подкреплённых тонкостенных элементов конструкций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 69–78.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-69-78

T.A. TREPUTNEVA, M.O. MOISEENKO, O.N. POPOV,
V.N. BARASHKOV, D.N. PESTSOV,
Tomsk State University of Architecture and Building

STRESS-STRAIN STATE OF REINFORCED THIN-WALLED STRUCTURAL ELEMENTS

The most common structures designed for the installation of technological equipment in workshops are beam platforms mounted from rolled steel and sheet elements. The values of strains and stresses of ribbed plates obtained in accordance with the linear theory, significantly differ from the values obtained in terms of physical and geometrical nonlinearities.

A joint consideration of the double nonlinearity significantly clarifies the mathematical model of the reinforced flexible plates and shells, which provides a complete idea of the stress-strain state of the structure.

The paper presents a calculation algorithm for the flexible plates reinforced by a stiffening plates and hollow shells based on the Lagrange function method. The stress-strain state of a plate symmetrically reinforced by a stiffening plate is investigated under the uniform loading conditions.

Keywords: reinforced plates; stress-strain state; physical and geometrical nonlinearities.

For citation: Treputneva T.A., Moiseenko M.O., Popov O.N., Barashkov V.N., Pestsov D.N. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie podkreplennykh tonkostennykh elementov konstruktсии [Stress-strain state of reinforced thin-walled structural elements]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 4. Pp. 69–78. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-69-78

На рубеже XIX и XX вв. гибкие пластины и пологие оболочки оказались востребованы в кораблестроении в связи с переходом к металлическим корпусам судов. В 30-х гг. XX в. значительно увеличилось число исследований напряжённо-деформированного состояния (НДС) пластин и пологих оболочек вследствие развития самолётостроения. Позже конструкции, выполненные из гибких пластин, получили широкое применение в большепролётном строительстве благодаря небольшому весу, высокой прочности и простоте монтажа. Исследованию тонкостенных элементов конструкций посвятили свои работы Л.В. Енджиевский, Э.И. Григолюк, В.Г. Зубчанинов, В.В. Кабанов, А.И. Колгадин, В.А. Крысько, Л.С. Ляхович, В.В. Петров, А.И. Стрельбицкая, А.М. Черняк и многие другие [1].

В процессе эксплуатации такие конструкции находятся под действием силовых нагрузок и для увеличения жёсткости пластины часто выполняются ребристыми. Исследования НДС ребристых конструкций являются более сложными по сравнению с конструкциями, выполненными из гладких элементов. Основы расчёта ребристых элементов конструкций были заложены В.З. Власовым, А.И. Лурье [2, 3], которые на основе ряда допущений установили связь между пластиной и подкрепляющими её элементами.

Чтобы получить наиболее полное представление о НДС тонкостенных элементов конструкций и работе материала, необходимо учитывать одновременно физическую и геометрическую нелинейности [5–7].

В настоящей работе представлен алгоритм расчёта подкреплённых гибких пластин, пологих оболочек и состоящих из них конструкций, нагруженных статической нагрузкой. Расчёт конструкций предложено вести вариационным методом Ритца с применением функционала полной потенциальной энергии элементов и расчётной схемы метода перемещений [5]. Конструкция разбивается на отдельные панели и поставленные с эксцентриситетом подкрепляющие элементы. По линиям контакта отдельных панелей и подкрепляющих элементов вводятся узловые линии, каждая из которых в общем случае имеет четыре неизвестных функциональных перемещения. Коэффициенты при функциональных перемещениях обеспечивают совместность перемещений сочленяемых элементов конструкции.

Координатные функции перемещений, полученные по вариационному методу Власова – Канторовича, задаются в виде суммы двух рядов:

$$U_k = \sum_n^N U_{ok}^{(n)} B_k^{(n)} + \sum_n^N U_{nk}^{(n)} Z_j^{(n)},$$

$$V_k = \sum_n^N V_{ok}^{(n)} C_k^{(n)} + \sum_n^N V_{nk}^{(n)} Z_j^{(n)},$$

$$W_k = \sum_n^N W_{ok}^{(n)} A_k^{(n)} + \sum_n^N W_{nk}^{(n)} Z_i^{(n)}.$$

Здесь N – число взятых в разложении гармоник; $U_{ok}, V_{ok}, W_{ok}, U_{nk}, V_{nk}, W_{nk}$ – координатные функции, удовлетворяющие геометрическим граничным условиям на кромках k -й панели; $A_k^{(n)}, B_k^{(n)}, C_k^{(n)}, Z_i, Z_j$ – варьируемые параметры.

Учёт геометрической нелинейности принимается по теории Т. Кармана с учётом гипотез Кирхгофа – Лява для панели и Бернулли – для ребра. Для расчёта нелинейно-упругого материала используется деформационная теория пластичности А.А. Ильюшина. Физические характеристики материала являются однозначными функциями деформаций, материал конструкции нелинейно-упругий, а при отсутствии разгрузки – упругопластический.

Деформации в срединной поверхности отдельной панели $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ записываются в зависимости от перемещений U, V, W вдоль осей x, y, z соответственно:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x} + 0,5 \left(\frac{\partial(W + W_n)}{\partial x} \right)^2 - 0,5 \left(\frac{\partial W_n}{\partial x} \right)^2 - k_1 W; \quad \chi_x = -\frac{\partial^2 W}{\partial x^2}; \\ \varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y} + 0,5 \left(\frac{\partial(W + W_n)}{\partial y} \right)^2 - 0,5 \left(\frac{\partial W_n}{\partial y} \right)^2 - k_2 W; \quad \chi_y = -\frac{\partial^2 W}{\partial y^2}; \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial(W + W_n)}{\partial y} \frac{\partial(W + W_n)}{\partial x} - \frac{\partial W_n}{\partial y} \frac{\partial W_n}{\partial x}; \quad \chi_{xy} = -\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y}. \end{array} \right.$$

Здесь k_1, k_2 – главные кривизны панели вдоль осей x и y соответственно; χ_x, χ_y – функции изменения кривизны срединной поверхности; χ_{xy} – функция изменения кручения срединной поверхности; U, V, W – координатные функции; W_n – начальный прогиб.

Относительные деформации панели в точках, расположенных на расстоянии z от срединной поверхности, записываются согласно гипотезе Кирхгофа – Лява [4]:

$$\varepsilon_{x,o}^z = \varepsilon_x + z\chi_x; \quad \varepsilon_{y,o}^z = \varepsilon_y + z\chi_y; \quad \gamma_{xy,o} = \gamma_{xy} + 2z\chi_{xy}.$$

Относительные деформации рёбер в точках, расположенных на расстоянии x и y от оси ребра, с учётом изгиба в двух плоскостях, продольной деформации и кручения определяются зависимостями [5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{x,p}^z = \varepsilon_{x,p} - z \frac{\partial^2 W_p}{\partial x^2} - y \frac{\partial^2 V_p}{\partial x^2} = -y \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - e \frac{\partial^3 W}{\partial x^2 \partial y} \right) - z \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \\ + \frac{\partial U}{\partial x} + 0,5 \left(\frac{\partial(W + W_n)}{\partial x} \right)^2 - 0,5 \left(\frac{\partial W_n}{\partial x} \right)^2 - k_1 W - e \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}; \\ \varepsilon_{y,p}^z = \varepsilon_{y,p} - z \frac{\partial^2 W_p}{\partial y^2} - x \frac{\partial^2 U_p}{\partial y^2} = -x \left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} - e \frac{\partial^3 W}{\partial x \partial y^2} \right) - z \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \\ + \frac{\partial V}{\partial y} + 0,5 \left(\frac{\partial(W + W_n)}{\partial y} \right)^2 - 0,5 \left(\frac{\partial W_n}{\partial y} \right)^2 - k_2 W - e \frac{\partial^2 W}{\partial y^2}; \\ \gamma_{zy,p} = \gamma_{zx,p} = \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y}. \end{array} \right.$$

Деформация вдоль оси ребра записывается с учётом эксцентриситета e ребра относительно срединной поверхности отдельной панели:

$$\varepsilon_{x,p} = \varepsilon_{x,o}^z + e\chi_x; \quad \varepsilon_{y,p} = \varepsilon_{y,o}^z + e\chi_y.$$

Перемещения рёбер относительно срединной поверхности и углы закручивания осей ребра записываются согласно гипотезе Кирхгофа – Клебша с учётом эксцентриситета e [6]:

$$W_p = W; \quad U_p = U + e \frac{\partial W}{\partial x}; \quad V_p = V + e \frac{\partial W}{\partial y}; \quad \frac{\partial W_p}{\partial x} = \frac{\partial W}{\partial x}.$$

Индекс o относится к оболочке (пластине), а индекс p – к ребру.

Физические соотношения для тонкостенных элементов конструкций получены путём выражения напряжений через деформации.

Напряжения, возникающие в оболочке:

$$\begin{aligned} \sigma_{x,o}^z &= E_{cj1}^z \left[\frac{\varepsilon_{x,o}^z + \mu_{cj2}^z \varepsilon_{y,o}^z}{1 - \mu_{cj1}^z \mu_{cj2}^z} + t^{\circ z} (\alpha_{j1T}^z + \mu_{cj2}^z \alpha_{j2T}^z) \right]; \\ \sigma_{y,o}^z &= E_{cj2}^z \left[\frac{\varepsilon_{y,o}^z + \mu_{cj1}^z \varepsilon_{x,o}^z}{1 - \mu_{cj1}^z \mu_{cj2}^z} + t^{\circ z} (\alpha_{j2T}^z + \mu_{cj1}^z \alpha_{j1T}^z) \right]; \\ \tau_{xy,o}^z &= G_j^z \gamma_{xy}^z. \end{aligned}$$

Напряжения, возникающие в рёбрах [7]:

$$\begin{aligned} \sigma_{x,p}^z &= E_{cj1}^z (\varepsilon_{x,p}^z + \alpha_{j1T}^z t^{\circ z}); \quad \sigma_{y,p}^z = E_{cj2}^z (\varepsilon_{y,p}^z + \alpha_{j2T}^z t^{\circ z}); \\ \tau_{zy,p}^z &= \frac{\gamma_{kp} E_{cj}^z \gamma_{zy}^z}{2(1 + \mu_{cj}^z)}; \quad \tau_{zx,p}^z = \frac{\gamma_{kp} E_{cj}^z \gamma_{zx}^z}{2(1 + \mu_{cj}^z)}. \end{aligned}$$

Здесь E_{cj1}^z, E_{cj2}^z – секущие модули упругости; μ_{cj1}^z, μ_{cj2}^z – функции сжимаемости; G_j^z – модуль сдвига; γ_{kp} – коэффициент, учитывающий соотношение сторон призматического ребра при кручении [6].

Вариационное уравнение равновесия записывается в форме Лагранжа [8] и линеаризуется по методу переменных параметров упругости (метод И.А. Биргера) [9]:

$$\delta\Phi = \delta\Pi - \delta A = 0.$$

Здесь Φ – функционал полной энергии системы; Π – потенциальная энергия внутренних сил; A – работа внешних сил.

Для системы ребристых пологих оболочек и пластин функционал полной потенциальной энергии всей конструкции записывается в виде суммы энергий панелей, рёбер и потенциала внешней нагрузки.

Координатные функции перемещений, полученные по вариационному методу Власова – Канторовича, и деформации, выраженные через них, подставляются в выражения для функционала полной энергии. В итоге получается многопараметрическая функция, зависящая от варьируемых параметров функций перемещений, которые, по методу переменных параметров упругости [9], на каждом шаге итерационного процесса определяются из условия минимума энергии методом прямого поиска. По найденным варьируемым параметрам функций перемещений определяются сами перемещения, а также деформации и напряжения в любой точке конструкции. Расчёт выполняется при помощи разработанной компьютерной программы [10].

По вышеприведенному алгоритму расчёта проводится исследование НДС элемента настила балочной площадки.

В качестве расчётной модели принята нагруженная распределённой статической нагрузкой гибкая пластина размером $60 \times 150 \times 1$ см, выполненная из материала Ст3. Пластина разделена на две панели размером в плане $a \times b = 60 \times 75$ см. По центру пластины находится ребро с эксцентриситетом относительно срединной плоскости пластины. Размер ребра $b_p \times h_p = 2 \times 5$ см.

На рис. 1 представлена расчётная схема двухпанельной пластины.

Расчёт проводился при статических нагрузках, равных $q = 0,1; 0,5; 1; 1,5; 2$ МПа. В результате расчёта определялись приведённые прогибы W/h срединной поверхности пластины и приведённая интенсивность деформаций e_i/e_s (e_i – интенсивность деформаций, e_s – деформация, соответствующая пределу текучести материала) в точках на верхней и нижней поверхностях пластины. Строились и анализировались эпюры приведённых прогибов и графики приведённой интенсивности деформаций в наиболее характерных точках в зависимости от величины поперечной нагрузки, вызывающей как упругие, так и упругопластические деформации.

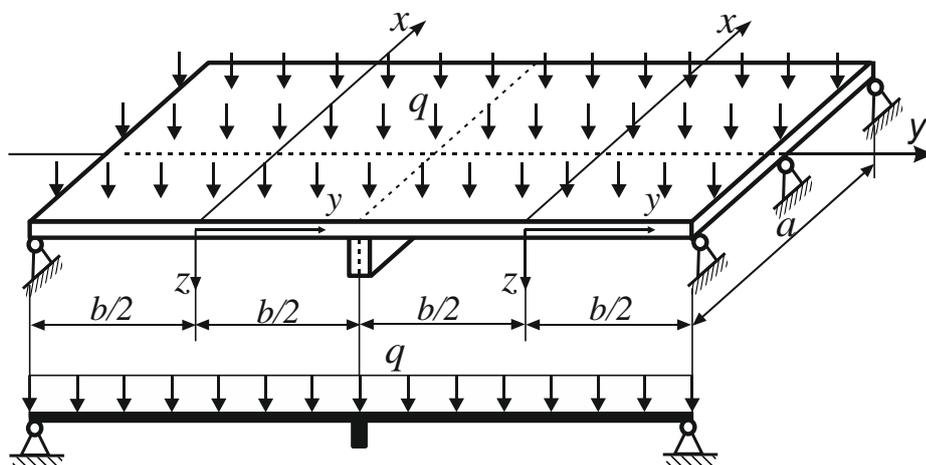


Рис. 1. Расчётная схема двухпанельной пластины

В табл. 1 приведены результаты расчётов двухпанельной пластины.

Таблица 1

Нагрузка q , МПа	Приведённые прогибы W/h		Приведённая интенсивность деформаций e_i/e_s			
			в точках на верхней поверхности		в точках на нижней поверхности	
	$y' = 37,5$	$y' = 75$	$y' = 37,5$	$y' = 75$	$y' = 37,5$	$y' = 75$
0,1	0,0358	0,0061	-0,055517	0,049060	0,041660	-0,048177
0,5	0,1706	0,0244	-0,229148	0,233841	0,235440	-0,233228
1	0,3147	0,046	-0,401600	0,427481	0,458498	-0,426790
1,5	0,4314	0,0663	-0,53162	0,578264	0,651529	-0,577439
2	0,5277	0,0857	-0,632593	0,696675	0,819467	-0,695682

На рис. 2 представлена эпюра приведённых прогибов, подкреплённых ребром жесткости пластины, находящейся под действием силовой нагрузки, на рис. 3 – график зависимости «нагрузка – приведённые прогибы срединной поверхности пластины».

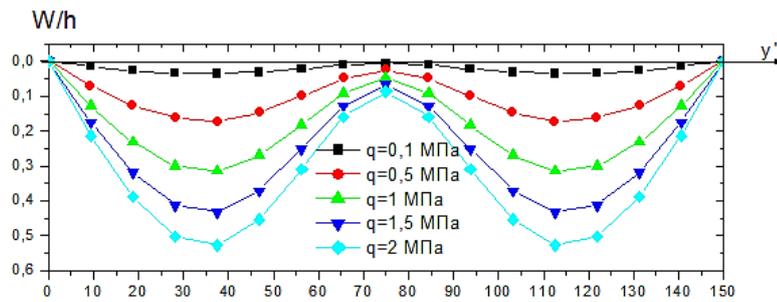
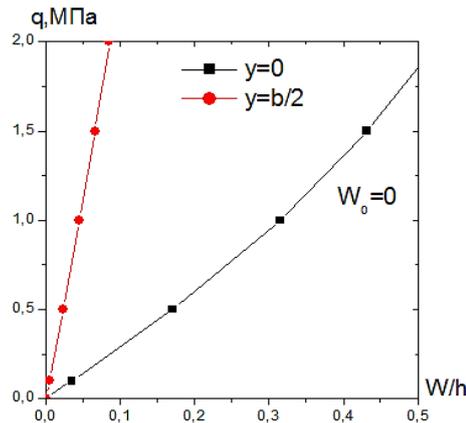


Рис. 2. Эпюра прогибов двухпанельной пластины

Рис. 3. График зависимости прогибов срединной поверхности пластины от нагрузки в центре панели ($y' = 37,5$) и в центре пластины ($y' = 75$)

На рис. 4 изображены эпюры приведённой интенсивности деформаций в точках, находящихся на верхней и нижней поверхностях пластины в центре панели и возле ребра жесткости. На рис. 5 представлены графики зависимости приведённой интенсивности деформаций в точках на верхней и нижней поверхностях в центре панели ($y' = 37,5$) и центре пластины ($y' = 75$) от действующей нагрузки (рис. 1).

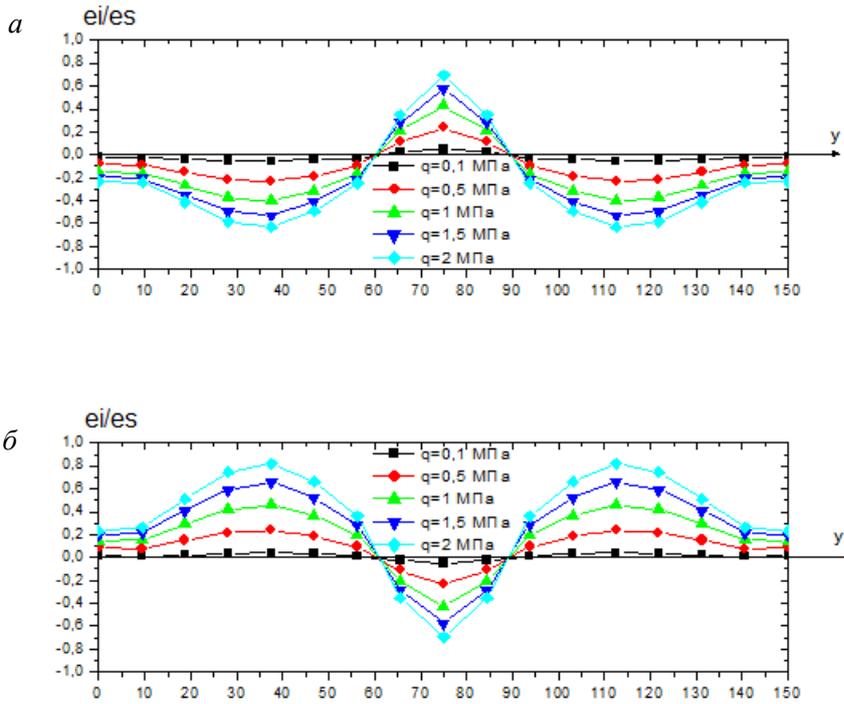


Рис. 4. Эпюры интенсивности деформаций в точках:
 а – на верхней поверхности пластины; б – на нижней поверхности пластины

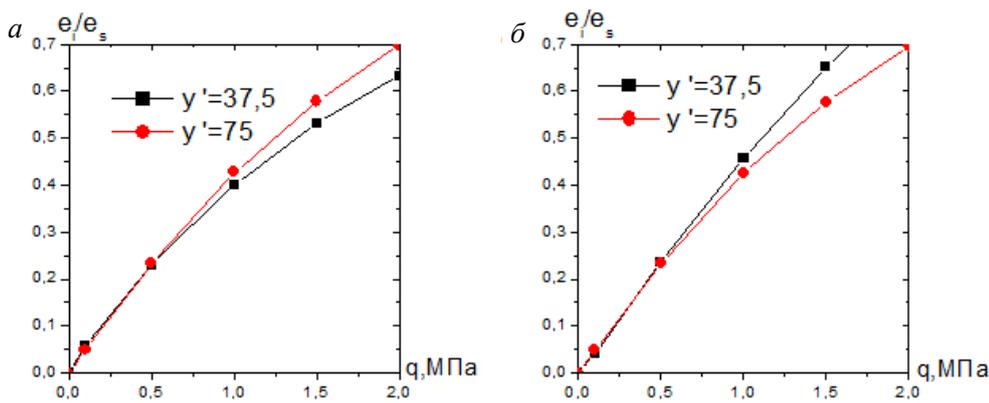


Рис. 5. Графики зависимости интенсивности деформаций от нагрузки в точках:
 а – на верхней поверхности пластины; б – на нижней поверхности пластины

Анализ полученных результатов расчёта двухпанельной пластины, нагруженной равномерно распределённой нагрузкой, показал, что наибольшее значение величин приведённых прогибов и приведённой интенсивности деформаций возникает в центре панелей.

Значения относительных прогибов (табл. 1) при максимально рассматриваемой нагрузке $q = 2$ МПа в центре отдельной панели ($W/h = 0,5277$) и на ребре ($W/h = 0,0857$) отличаются в 6,2 раза. Ребро жёсткости уменьшило прогибы и оказало влияние на общее напряжённо-деформированное состояние пластины.

В центре пластины ($y' = 75$) приведённая интенсивность деформаций в точках на верхней и нижней поверхностях отличается по модулю незначительно (рис. 4, табл.1). Максимальное отличие составило 1,8 % при нагрузке $q = 0,1$ МПа.

При росте нагрузки до 2 МПа (см. табл. 1) в точках на верхней поверхности значение приведённой интенсивности деформаций в центре панели меньше, чем в центре пластины (при нагрузке $q = 2$ МПа разница значений интенсивности деформаций составила 9,2 %). В точках на нижней поверхности значение приведённой интенсивности деформаций (см. табл. 1) в центре панели ($y' = 37,5$) больше, чем в центре пластины ($y' = 75$) (при $q = 2$ МПа разница значений составила 15,1 %).

Для определения значений НДС, получаемых при линейном решении ($q = 2$), увеличиваем полученные численные значения при $q = 0,1$ МПа (табл. 1) в 20 раз (табл. 2)

Таблица 2

Нагрузка q , МПа	Приведённые прогибы W/h		Приведённая интенсивность деформаций e_i / e_s			
			в точках на верхней поверхности		в точках на нижней поверхности	
	$y' = 37,5$	$y' = 75$	$y' = 37,5$	$y' = 75$	$y' = 37,5$	$y' = 75$
0,1	0,0358	0,0061	-0,055517	0,049060	0,041660	-0,048177
1	0,358	0,061	-0,55517	0,4906	0,4166	-0,048177
2	0,716	0,1222	-1,11034	0,9812	0,8332	-0,96354

Сравнение нелинейных результатов расчёта (табл. 1), полученных численно, с линейными (табл. 2) показало, что неучёт нелинейностей ведёт к погрешности расчётов.

Так при определении приведённых прогибов центра панелей при нагрузке $q = 1$ МПа разница между результатами, полученными при линейном и нелинейном расчётах, составила 14 %. А при нагрузке $q = 2$ МПа – 36 %. При определении приведённой интенсивности деформаций верхних волокон процент погрешности при неучёте нелинейностей составил 38 % при нагрузке $q = 1$ МПа и 75 % при нагрузке $q = 2$ МПа.

В центре пластины при нагрузке $q = 2$ МПа при определении приведённых прогибов различие составило 42 %, при определении приведённой интенсивности деформаций – 40 %.

Выводы

В представленной статье приведён алгоритм расчёта пластинчато-стержневой системы с учётом нелинейностей. Геометрическая нелинейность рассматривается в квадратичном приближении по Карману. Физическая нелинейность учитывается согласно деформационной теории пластичности. Решение проводится с применением функций перемещений, амплитудные значения которых отыскиваются из минимума построенного функционала на каждом этапе приближения по методу переменных параметров упругости.

По представленному алгоритму расчета проведён расчёт подкреплённой пластины с учётом нелинейности. На примере расчёта показана необходимость учёта нелинейностей при исследовании НДС. Неучёт нелинейностей ведёт к значительной погрешности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов О.Н., Малиновский А.П., Моисеенко М.О., Трепутнёва Т.А. Состояние вопроса по расчету неоднородных элементов конструкций за пределом упругости // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 4. С. 128–142.
2. Власов В.З. Общая теория оболочек и её приложение в технике. Москва : Гостехиздат, 1949. 784 с.
3. Лурье А.И. Статика тонкостенных упругих оболочек. Москва ; Ленинград : Гостехиздат, 1947. 252 с.
4. Вольмир А.С., Куранов Б.А., Турбаивский А.Т. Статика и динамика сложных структур: Прикладные многоуровневые методы исследований. Москва : Машиностроение, 1989. 248 с.
5. Попов О.Н., Малиновский А.П., Моисеенко М.О. Нелинейные задачи ребристых оболочек. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2004. 172 с.
6. Климанов В.И., Тимашев С.А. Нелинейные задачи подкреплённых оболочек. Свердловск : УНЦ АН СССР, 1985. 291 с.
7. Петров В.В. Теория и расчет пластинок и оболочек. Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2014.
8. Стрельбицкая А.С., Колгадин В.А., Матошко С.И. Изгиб прямоугольных пластин за пределом упругости. Киев : Наукова думка, 1971. 244 с.
9. Биргер И.А. Метод переменных параметров упругости в задачах теории пластин и оболочек // Труды XII Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. 12–17 июня 1980 г. Т. 1. Ереван, 1980. С. 179–185.
10. Попов О.Н., Моисеенко М.О., Трепутнёва Т.А. Расчёт тонкостенных конструкций с начальным прогибом : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614725 от 26.04.2017./ Томский государственный архитектурно-строительный университет.

REFERENCES

1. Popov O.N., Malinovskii A.P., Moiseenko M.O., Treputneva T.A. Sostoyanie voprosa po raschetu neodnorodnykh elementov kon-struktsii za predelom uprugosti [Analysis of heterogeneous structural elements beyond elastic limit]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 4. Pp. 128–142. (rus)
2. Vlasov V.Z. Obshchaya teoriya obolochek i ee prilozhenie v tekhnike [General theory of shells and its engineering applications]. Moscow: Gostekhizdat, 1949. 784 p. (rus)
3. Lur'e A.I. Statika tonkostennykh uprugikh obolochek [Static state of thin-walled elastic shells]. Moscow, Leningrad: Gostekhizdat, 1947. 252 p. (rus)
4. Vol'mir A.S., Kuranov B.A., Turbaivskii A.T. Statika i dinamika slozhnykh struktur: Prikladnye mno-gourovnevye metody issledovaniy [Static state and dynamics of complex structures: applied multilevel research methods]. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 248 p. (rus)

5. *Popov O.N., Malinovskii A.P., Moiseenko M.O.* Nelineinye zadachi rebristyykh obolochek [Nonlinear problems for ribbed shells]. Tomsk: TSUAB. 2004. 172 p. (rus)
6. *Klimanov V.I., Timashev S.A.* Nelineinye zadachi podkreplennykh obolochek [Nonlinear problems of reinforced shells]. Sverdlovsk, 1985. 291 p. (rus)
7. *Petrov V.V.* Teoriya i raschet plastinok i obolochek [Theory and analysis of plates and shells]. Saratov, 2014. (rus)
8. *Strel'bitskaya A.S., Kolgadin V.A., Matoshko S.I.* Izgib pryamougol'nykh plastin za predelom uprugosti [Bending of rectangular plates beyond elastic limit] Kiev: Naukova dumka, 1971. 244 p. (rus)
9. *Birger I.A.* Metod peremennykh parametrov uprugosti v zadachakh teorii plastin i obolochek [Method of variable parameters of elasticity in problems of theory of plate and shell]. Trudy XII Vsesoyuznoi konferentsii po teorii obolochek i plastin (*Proc. 12th All-Union Conf. on Theory of Plate and Shell*). 1980. V. 1. Pp. 179–185. (rus)
10. *Popov O.N., Moiseenko M.O., Treputneva T.A.* Raschet tonkostennykh konstruksii s nachal'nym progibom [Thin-walled structure analysis with initial deflection]. RF Certificate of State Registration of Software N 2017614725. 2017. (rus)

Сведения об авторах

Трепутнева Татьяна Алексеевна, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tta2019tta@yandex.ru

Моисеенко Маргарита Олеговна, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, mmo77@mail.ru

Попов Олег Николаевич, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, onpopov2004@mail.ru

Барашков Владимир Николаевич, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, v.n.bar@mail.ru

Песцов Дмитрий Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, DmitryPestsov@rambler.ru

Authors Details

Tatiana T. Treputneva, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanya Sq., 634003, Tomsk, Russia, tta2019tta@yandex.ru

Margarita O. Moiseenko, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanya Sq., 634003, Tomsk, Russia, mmo77@mail.ru

Oleg N. Popov, PhD, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanya Sq., 634003, Tomsk, Russia, onpopov2004@mail.ru

Vladimir N. Barashkov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanya Sq., 634003, Tomsk, Russia, v.n.bar@mail.ru

Dmitry N. Pestsov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanya Sq., 634003, Tomsk, Russia, DmitryPestsov@rambler.ru

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 665.455:006.354

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-79-99

О.В. МАТВИЕНКО^{1,2}, А.Е. ЛИТВИНОВА²,

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,

²Национальный исследовательский

Томский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ТЕЧЕНИЯ ВЫСОКОПАРАФИНИСТОГО БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО, ОПИСЫВАЕМОГО МОДЕЛЬЮ БАЛКЛИ – ГЕРШЕЛЯ, В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ*

В работе проведено исследование течения битумного вяжущего, описываемого моделью Балкли – Гершеля, в цилиндрической трубе, определена зависимость расхода жидкости от перепада давления, получены зависимости для радиального распределения скорости и эффективной вязкости течения.

Установлено, что при низких значениях перепада давления неньютоновские свойства среды, обусловленные наличием внутренней структуры, приводят к значительному гидравлическому сопротивлению. С увеличением перепада давления гидравлическое сопротивление потока уменьшается, что связано с разрушением структуры среды.

Ключевые слова: реология; вязкопластические среды; вязкость; неньютоновские жидкости; модель Балкли – Гершеля.

Для цитирования: Матвиенко О.В., Литвинова А.Е. Исследование установившегося течения высокопарафинистого битумного вяжущего, описываемого моделью Балкли – Гершеля, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 79–99.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-79-99

О.В. MATVIENKO^{1,2}, А.Е. LITVINOVA²,

¹Tomsk State University of Architecture and Building,

²Tomsk State University

STEADY FLOW OF HIGH-PARAFFIN BITUMINOUS BINDER IN CYLINDRICAL TUBE IN TERMS OF HERSCHEL–BULKLEY FLUID

This paper deals with the flow of bitumen binder in a cylindrical tube described by the Herschel-Bulkley fluid. The dependence is suggested for the fluid flow rate and the pressure

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-70001.

drop. Dependences are also determined for the radial velocity distribution and effective viscosity. It is found that at a low pressure drop, the non-Newtonian properties of the medium lead to a significant hydraulic resistance due to the internal structure. With an increase in the pressure drop, the hydraulic resistance of the flow decreases.

Keywords: rheology; visco-plastic media; viscosity; non-Newtonian fluids; Hershel-Bulkley fluid.

For citation: Matvienko O.V., Litvinova A.E. Issledovanie ustanovivshegosya techeniya vysokoparafinitogo bitumnogo vyazhushchego, opisываемого model'yu Balkli – Gershelya, v tsilindricheskoi trube [Steady flow of high-paraffin bituminous binder in cylindrical tube in terms of Herschel – Bulkley fluid]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 4. Pp. 79–99.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-79-99

Введение

В настоящее время в дорожном строительстве остро стоит вопрос разработки и внедрения в практику асфальтобетонных улучшенного качества, способных обеспечивать более высокую прочность, долговечность дорожных покрытий. Одним из основных материалов, применяемых в дорожном строительстве, является асфальтобетон, в состав которого входят щебень, песок, различные добавки и вяжущее вещество [1–3]. Структурообразующим компонентом асфальтобетонной смеси является битумное вяжущее, которое должно выбираться в зависимости от температуры нагрева покрытия в летний период года и температуры охлаждения в зимний период.

При низких температурах битумы ведут себя как упругие тела. С увеличением температуры, длительности действия нагрузки и ее величины модуль деформации битумов существенно увеличивается, материал приобретает упругопластические свойства [4–6]. Переход битумов из упругопластического состояния в вязкопластическое происходит в интервале температур от 30 до 50 °С. При температурах выше 70 °С битумы становятся псевдопластическими, а при температуре более 100 °С – ньютоновскими жидкостями [7, 8].

При использовании битумных вяжущих необходимо учитывать свойства и особенности структуры исходного материала с целью уменьшения неоправданного расхода ресурсов. Существенно уменьшить трудоемкость при подборе составов битумных вяжущих с заданным комплексом физико-механических свойств и оперативно принимать решения по корректировке составов позволяют методы математического моделирования [9].

Реологические свойства битумных вяжущих

В дорожном строительстве битум нагревается до тех пор, пока он не станет достаточно жидким для перемешивания с каменным материалом [3, 10]. Одним из важных параметров, используемых для проведения гидравлических расчетов, является вязкость среды [11, 12].

Отношение между напряжением сдвига, действующим на перекачиваемую жидкость, и вызванной этим напряжением скорости сдвига характеризует эффективную динамическую вязкость.

Жидкости с линейной зависимостью касательных напряжений и скорости деформации называются ньютоновскими и описываются следующим уравнением [11–14]:

$$\tau_{ij} = 2\mu\dot{\epsilon}_{ij}, \quad (1)$$

где τ_{ij} , $\dot{\epsilon}_{ij}$ – компоненты тензора напряжений и скорости деформации; μ – коэффициент динамической вязкости.

Известно, что течение битумов в диапазоне температур от 30 до 100 °С характеризуется неньютоновскими свойствами [15]. Неньютоновское поведение характеризуется зависящей от скорости деформации сдвиговой вязкостью и происходит вследствие специфической молекулярной структуры битума [16, 17].

Для построения моделей неньютоновских жидких сред нужно установить связь между девиаторами тензора скоростей деформации и тензора напряжений. В тензорно-линейных моделях такая связь задаётся соотношениями

$$\tau_{ij} = 2\mu_{eff}\dot{\epsilon}_{ij}. \quad (2)$$

В классических моделях предполагается зависимость μ_{eff} только от второго инварианта девиатора тензора скоростей деформации [18, 19]. В качестве вторых инвариантов тензоров $\dot{\epsilon}$ и τ удобно ввести

$$U = \sqrt{2\dot{\epsilon}_{ij}^D\dot{\epsilon}_{ji}^D}, \quad T = \sqrt{\tau_{ij}\tau_{ij}/2}, \quad (3)$$

где $\dot{\epsilon}_{ij}^D = \dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{3}\dot{\epsilon}_{kk}\delta_{ij}$ – компоненты девиатора тензора скоростей деформации.

Из соотношений (2), (3) вытекает зависимость между инвариантами

$$T = \mu_{eff}U, \quad (4)$$

где μ_{eff} – коэффициент эффективной динамической вязкости.

Для описания течения *неструктурированных* неньютоновских сред используются модели нелинейно-вязких жидкостей. Эти жидкости характеризуются наличием нелинейной зависимости между напряжениями и скоростями деформаций и отсутствием предельного напряжения сдвига [20–23]. Нелинейно-вязкие жидкости подразделяются на псевдопластичные [24] и дилатантные [25]. Для псевдопластичных сред величина эффективной вязкости μ_{eff} снижается с ростом интенсивности скоростей сдвиговых деформаций U , а для дилатантных – увеличивается. В табл. 1 приведены наиболее распространенные реологические модели нелинейно-вязких жидкостей.

К наиболее простым моделям нелинейно-вязких жидкостей относится модель Оствальда – де Вейля [26, 27]. Постоянная k называется показателем (индексом) консистенции жидкости, чем меньше ее текучесть, тем больше k . Параметр n характеризует степень неньютоновского поведения материала, чем сильнее n отличается от единицы (в большую или меньшую сторону), тем отчетливее проявляется аномалия вязкости и нелинейность кривой течения. Значениям $0 < n < 1$ отвечают псевдопластичные жидкости, эффективная вязкость которых убывает с ростом скоростей сдвига. Ньютоновская жид-

кость характеризуется параметром $n = 1$. Значениям $n > 1$ отвечают дилатантные жидкости, у которых эффективная вязкость растет с увеличением скоростей сдвига.

Таблица 1

Реологические модели нелинейно-вязких жидкостей

Модель жидкости, фамилии авторов	Реологическое уравнение
Степенная жидкость, Оствальд – де Вейль	$T = kU^n, n > 0$
Сиско	$T = \mu_*U + kU^n, n > 0$
Кросс	$T = \frac{\mu_1 + \mu_2 (U/U_*)^{1-n}}{1 + (U/U_*)^{1-n}} U$
Уильямсон	$T = \left(\frac{\sigma_Y}{U_* + U} + \mu_0 \right) U$

К недостаткам модели Оствальда – де Вейля относится нереалистичное описание реологического поведения псевдопластических сред при больших скоростях сдвига ($U \rightarrow \infty$), а дилатантных – при малых ($U \rightarrow 0$). В этих случаях эффективная вязкость становится равной нулю. Отметим, что стремление эффективной вязкости к бесконечности при $U \rightarrow 0$ в псевдопластических средах и $U \rightarrow \infty$ в дилатантных объясняется их структурированием и формированием квазитвердых зон.

Реологическая модель Сиско [28–30] позволяет преодолеть отмеченный выше недостаток модели Оствальда – де Вейля. Параметр модели μ_* в случае псевдопластических сред характеризует эффективную вязкость при бесконечной скорости сдвига ($\mu_* = \mu_\infty$), в случае дилатантных сред – при нулевой ($\mu_* = \mu_0$).

В рамках модели Кросса [19] используется концепция вязкости при нулевой и бесконечной скорости сдвига. Для псевдопластических сред ($0 < n < 1$) параметр $\mu_1 = \mu_0$ соответствует вязкости при нулевой скорости сдвига, а $\mu_2 = \mu_\infty$ – при бесконечной.

Модель Уильямсона [31] может применяться для описания движения псевдопластических жидкостей, близких по своим свойствам к структурированным средам. При малых значениях реологического параметра U_* эта модель описывает поведение вязкопластических сред. Однако в отличие от моделей структурированных сред в реологическом уравнении Уильямсона нет предельного напряжения сдвига.

Для описания деформационного поведения различных *структурированных* дисперсных сред существует множество реологических моделей, передающих в определенном диапазоне напряжений сдвига отдельные особенности реального течения [19–22, 32, 33]. В табл. 2 приведены характерные модели течения таких сред.

Таблица 2

Реологические модели структурированных сред

Модель жидкости, фамилии авторов	Реологическое уравнение
Шведова – Бингама	$\tau_{ij} = 2 \left(\mu_{pl} + \frac{\sigma_Y}{U} \right) \dot{\epsilon}_{ij}, \quad \text{если } \sigma_Y < T$ $\dot{\epsilon}_{ij} = 0, \quad \text{если } T < \sigma_Y$
Балкли – Гершеля	$\tau_{ij} = 2 \left(KU^{n-1} + \frac{\sigma_Y}{U} \right) \dot{\epsilon}_{ij}, \quad \text{если } \sigma_Y < T$ $\dot{\epsilon}_{ij} = 0, \quad \text{если } T < \sigma_Y$
Кэссона	$\sqrt{\tau_{ij}} = 2 \left(\frac{k}{\sqrt{U}} + \frac{\sqrt{\sigma_Y}}{U} \right) \dot{\epsilon}_{ij}, \quad \text{если } \sigma_Y < T$ $\dot{\epsilon}_{ij} = 0, \quad \text{если } T < \sigma_Y$
Кэссона – Шульмана	$\sqrt[n]{\tau_{ij}} = 2 \left(KU^{(1-n)/n} + \frac{\sqrt[n]{\sigma_Y}}{U} \right) \dot{\epsilon}_{ij}, \quad \text{если } \sigma_Y < T$ $\dot{\epsilon}_{ij} = 0, \quad \text{если } T < \sigma_Y$
Шульмана	$\sqrt[n]{\tau_{ij}} = 2 \left(KU^{(1-m)/m} + \frac{\sqrt[n]{\sigma_Y}}{U} \right) \dot{\epsilon}_{ij}, \quad \text{если } \sigma_Y < T$ $\dot{\epsilon}_{ij} = 0, \quad \text{если } T < \sigma_Y$

Двухпараметрическая модель Кэссона хорошо зарекомендовала себя для типографских и масляных красок, лакокрасочных композиций, крови, пищевых композиций типа шоколадных масс, неводных дисперсий пласто- и эластомеров и других дисперсных систем. Модель Шульмана обобщает большинство наиболее употребительных моделей. Из нее как частные случаи следуют модели Ньютона ($\sigma_Y = 0$, $m = n = 1$), Шведова – Бингама ($m = n = 1$) [34, 35], Балкли – Гершеля ($n = 1$) [36, 37], Оствальда – де Вейля ($\tau_Y = 0$), Кэссона ($m = n = 2$) и др. Она записывает нелинейную пластичность и аномальную вязкость и потому названа обобщенной моделью нелинейно-вязкопластичной жидкости [19].

Наибольшее практическое распространение для описания поведения вязкопластичных структурированных дисперсных систем получила реологическая модель течения неньютоновских жидкостей Шведова – Бингама [34]. Для одновременного учета нелинейности кривой течения и наличия предельного напряжения сдвига необходимо использовать реологическое уравнение Балкли – Гершеля [35], которое представляет собой степенное реологическое уравнение Оствальда – де Вейля с добавлением предела текучести.

При анализе течений сред, описываемых моделью Балкли – Гершеля, по аналогии с ньютоновской жидкостью удобно ввести в рассмотрение эффективную вязкость μ_{eff} , [36] которая может быть рассчитана как

$$\mu_{eff} = kU^{n-1} + \frac{\sigma_Y}{U}. \quad (5)$$

Первое слагаемое в (5) $\mu_{pl} = kU^{n-1}$ характеризует так называемую пластическую вязкость, ответственную за деформацию макромолекул и их ориентацию в потоке, второе – $\mu_{str} = \frac{\sigma}{U}$ структурную вязкость, связанную с необходимостью приложения напряжений, превосходящих предел текучести для разрушения структуры среды.

С точки зрения коллоидной химии битумные вяжущие представляют собой многокомпонентную коллоидную систему, т. е. жидкость, в которой взвешены мицеллы – полутвёрдые сгустки высокомолекулярных смол, асфальтенов и карбенов, нерастворимых в жидких углеводородах при обычных температурах, а также минеральных частиц и капель воды. В основном в битумах представлены парафиновые (обычно 30–35 %, реже 40–50 % по объёму) и нафтенковые (25–75 %) соединения, в меньшей степени – соединения ароматического ряда (10–20 %, реже 35 %) и смешанного, или гибридного, строения (например, парафино-нафтенковые, нафтенно-ароматические). Элементарный химический состав всех видов битума достаточно близок: 70–85 % углерода, 10–15 % водорода, 5–10 % кислорода, 1–5 % серы, до 1 % азота и незначительное количество некоторых металлов (V, Ni, Co, Fe, U) в виде сложных комплексов. Типичными для битумов являются функциональные группы: OH, -CH=CH-, COOR, COO, COOH. О качественном составе входящих в битумы углеводородов позволяет судить отношение C/H, для нафтенковых углеводородов оно выше, чем у парафиновых, для ароматических – выше, чем у нафтенковых [6].

В случае высокого содержания парафинов в вяжущем, особенно при низких температурах, дисперсная фаза образует непрерывную трехмерную коагуляционную структуру, обладающую определенной прочностью, характеризуемую предельным напряжением сдвига σ_Y . Увеличение σ_Y повышает сопротивляемость среды сдвигу и уменьшает скорость сдвиговых деформаций.

Большинство исследователей полагают, что присутствие высокоплавких парафинов в битуме негативно отражается на свойствах как самого вяжущего, так и асфальтобетона на его основе. Считается, что плавление парафинов приводит к снижению устойчивости асфальтобетона к колееобразованию, а их кристаллизация при низких температурах – к повышению склонности к низкотемпературному растрескиванию. Кроме того, с высоким содержанием твердых парафинов часто ассоциируют невысокую адгезию вяжущего с минеральным наполнителем в асфальтобетоне [38, 39]. Поэтому в российском стандарте ГОСТ 33133–2014 имеется нормирующий показатель содержания твёрдых парафинов (не более 3 %) [40].

Движение отдельных макромолекул в легких малопарафинистых вязущих, характеризуемых невысокими значениями показателя консистенции, происходит относительно независимо друг от друга. Поэтому постоянные контакты между макромолекулами отсутствуют. Неньютоновское поведение таких сред обусловлено изменением формы их макромолекул в результате воздействия перепада давления. Увеличение показателя консистенции приводит к более частым контактам между макромолекулами и в конце концов к образованию сетки зацеплений, препятствующей сдвиговому течению.

Показатель нелинейности с точки зрения микрореологии характеризует структуру макромолекул среды. Для простейшей модели макромолекул в виде упругих шаров показатель нелинейности $n = 1$, что соответствует модели ньютоновской жидкости. С увеличением длины и разветвленности макромолекул показатель нелинейности уменьшается. При этом неньютоновские свойства среды становятся более выраженными: в средах с малыми показателями нелинейности при одном и том же перепаде давления интенсивность скоростей сдвиговых деформаций уменьшается.

Одно из возможных объяснений неньютоновского поведения высокопарафинистых вязущих основывается на соотношении между характерным временем установления межмолекулярных зацеплений t_{str} и характерным временем деформирования t_{def} , которое может быть определено как величина, обратная интенсивности скоростей сдвиговых деформаций $t_{def} = U^{-1}$. Если $t_{str} \ll t_{def}$, то межмолекулярные связи могут рассматриваться как стабильные. Тогда среда теряет свойство текучести с увеличением t_{str} . При уменьшении t_{def} межмолекулярные связи становятся квазистабильными, и в некоторых узлах коагуляционной структуры появляется возможность проскальзывания макромолекул. Доля квазистабильных узлов увеличивается с ростом скоростей сдвига. При этом сопротивление сдвигу, а следовательно, эффективная вязкость уменьшаются. С увеличением скорости сдвига при выполнении условия $t_{def} \ll t_{str}$ структурированность среды нарушается, межмолекулярные связи становятся несущественными, молекулы ориентируются вдоль направления движения. В результате этого сопротивление среды ослабевает, что означает уменьшение эффективной вязкости. При этом реологическое поведение среды приближается к ньютоновскому.

Цикл теоретических исследований процессов течения и модифицирования битумов в технологических устройствах проведен в работах [41–46]. В работах [41, 42] приведены результаты исследования процессов модифицирования битумов в кавитационно-смесительном диспергаторе и инжекторном смесителе. В работе [43] построена модель движения пузырька в закрученном потоке неньютоновской жидкости, что дает возможность оптимизировать процесс вспенивания битума, улучшая его свойства. В работах [44, 45] исследована кавитация в кавитационно-смесительном диспергаторе. В работе [46] разработана физико-математическая модель и выполнен расчет распада струи битума в спутном закрученном потоке водной фазы. Показано, что рост за-

крутки потока приводит к интенсификации турбулентности в потоке и, следовательно, способствует более быстрому распаду струи.

Целью настоящей работы является исследование установившегося течения битумного вязущего, описываемого моделью Балкли – Гершеля, в цилиндрическом канале.

Математическая модель течения битумного вязущего

Рассмотрим установившееся осесимметричное течение битумного вязущего с высоким содержанием парафинов в прямой горизонтальной трубе круглого сечения радиусом R . Координату x , отсчитываемую вдоль оси трубы, направим вниз по потоку. При этих условиях уравнение реодинамики может быть записано в виде

$$-\frac{dp}{dx} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr}(r\tau_{rx}) = 0. \quad (6)$$

Проинтегрировав уравнение (6), получим

$$\tau_{rx} = -\frac{1}{2} \left| \frac{dp}{dx} \right| r. \quad (7)$$

Таким образом, сдвиговые напряжения линейно изменяются по сечению трубы. В центре трубы они равны нулю и достигают максимального абсолютного значения на стенке.

Характерной особенностью реологического поведения вязкопластических сред, к которым относятся жидкости Балкли – Гершеля, является наличие предела текучести σ_Y . Если интенсивность сдвиговых напряжений $T = \sqrt{\tau_{ij}\tau_{ij}/2} = |\tau_{rx}|$, возникающих в среде, не превосходит предела текучести, то среда ведет себя как твердое тело. Для возникновения сдвигового течения необходимо выполнение условия $T > \sigma_Y$.

Элементарный анализ уравнения (7) показывает, что в приосевой области $|\tau_{rx}| < \sigma_Y$. Вблизи оси формируется жесткая зона квазитвердого течения, в которой отсутствуют деформации. Во внешней части потока происходит сдвиговое течение среды. Радиальная координата границы этих зон может быть найдена из условия равенства напряжений на этой границе предельному напряжению сдвига:

$$r = r_Y : \quad |\tau_{rx}| = \frac{1}{2} \left| \frac{dp}{dx} \right| r_Y = \sigma_Y. \quad (8)$$

Таким образом, граница жесткой зоны может быть определена как

$$r_Y = 2\sigma_Y \left| \frac{\partial p}{\partial x} \right|^{-1}. \quad (9)$$

Заметим, что величина r_Y определяет условие, при котором возможно течение в канале. Течение в канале реализуется при выполнении условия $r_Y < R$, если $R \leq r_Y$, то происходит запаривание канала и течение становится невозможным.

В зоне сдвигового течения реологический закон Балкли – Гершеля для установившегося течения в канале можно записать в виде

$$\tau_{rx} = \left(kU^{n-1} + \frac{\sigma_Y}{U} \right) \frac{du}{dr}, \quad (10)$$

где $U = \left| \frac{du}{dr} \right|$ – интенсивность скоростей сдвиговых деформаций; k – консистенция среды; n – показатель нелинейности.

Поскольку величина скорости убывает по мере удаления от оси и приближении к стенке, то $\frac{du}{dr} < 0$. С учетом этого факта напряжения в сдвиговой области могут быть описаны зависимостью

$$\tau_{rx} = - \left(k \left| \frac{du}{dr} \right|^n + \sigma_Y \right). \quad (11)$$

Принимая во внимание соотношение (7), можно записать выражение

$$\frac{du}{dr} = - \left(\frac{\sigma_Y}{kr_Y} \right)^{1/n} (r - r_Y)^{1/n}. \quad (12)$$

Интегрирование уравнения (12) с учетом условия прилипания на стенке

$$r = R : \quad u = 0 \quad (13)$$

приводит к следующему результату:

$$u = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\sigma_Y}{kr_Y} \right)^{1/n} (R - r_Y)^{(n+1)/n} \left[1 - \left(\frac{r - r_Y}{R - r_Y} \right)^{(n+1)/n} \right]. \quad (14)$$

Во внутренней области течения $r < r_Y$ среда движется как твердое тело с плоским профилем осевой скорости:

$$u = u_Y = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\sigma_Y}{kr_Y} \right)^{1/n} (R - r_Y)^{(n+1)/n}. \quad (15)$$

Расход жидкости через поперечное сечение трубы вычисляется по формуле

$$Q = 2\pi \int_0^R u r dr = 2\pi \frac{n}{3n+1} \left(\frac{\sigma_Y}{kr_Y} \right)^{1/n} (R - r_Y)^{(n+1)/n} \times \left[\frac{1}{2} R^2 + \frac{1}{2n+1} R r_Y + \frac{n^2}{(n+1)(2n+1)} r_Y^2 \right], \quad (16)$$

а среднерасходная скорость определяется как

$$\bar{u} = 2 \frac{n}{3n+1} \left(\frac{\sigma_Y}{kr_Y} \right)^{1/n} (R - r_Y)^{(n+1)/n} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2n+1} \frac{r_Y}{R} + \frac{n^2}{(n+1)(2n+1)} \frac{r_Y^2}{R^2} \right]. \quad (17)$$

Эффективная вязкость жидкости Балкли – Гершеля μ_{eff} для гидродинамически стабилизированного течения в цилиндрической трубе может быть рассчитана с помощью реологического соотношения

$$\mu_{eff} = k \left| \frac{du}{dr} \right|^{n-1} + \sigma_Y \left| \frac{du}{dr} \right|^{-1}. \quad (18)$$

Для определения эффективной вязкости воспользуемся реологическим соотношением (11) с учетом радиального распределения скорости (15). В результате в зоне ($r_Y < r$) течения получим

$$\mu_{eff} = \sigma_Y \frac{r}{r_Y} \left| \frac{du}{dr} \right|^{-1} = \sigma_Y^{(n-1)/n} k^{1/n} \frac{r}{r_Y} \left(\frac{r}{r_Y} - 1 \right)^{-1/n}. \quad (19)$$

В жесткой зоне среда ведет себя как твердое тело с бесконечно большой вязкостью.

В технических расчетах принято связывать перепад давления со средне-расходной скоростью течения с использованием коэффициента сопротивления ζ . Для этого предполагается, что перепад давления должен быть пропорционален динамическому напору:

$$\left| \frac{dp}{dx} \right| = \zeta \frac{\rho \bar{u}^2}{4R}. \quad (20)$$

Подставляя в равенство (20) значения $\left| \frac{dp}{dx} \right|$ из формул (9), (16), получим выражения для коэффициента сопротивления:

$$\zeta = \frac{64}{\text{Re}} = 32 \frac{\bar{\mu}}{\rho \bar{u} R} = \frac{2}{\rho R^2} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^2 \frac{\sigma_Y^{(n-2)/n} k^{2/n} \left(\frac{R}{r_Y} \right)^3 \left(\frac{R}{r_Y} - 1 \right)^{-2(n+1)/n}}{\left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2n+1} \frac{r_Y}{R} + \frac{n^2}{(n+1)(2n+1)} \frac{r_Y^2}{R^2} \right]^2}. \quad (21)$$

Равенство (21) выражает закон сопротивления для течения вязкопластической жидкости Балкли – Гершеля.

Результаты математического моделирования

Перейдем к анализу полученных результатов. Диапазон изменения параметров был выбран следующим: предельное напряжение сдвига – $\sigma_Y = 0-40$ Па, консистенция изменялась в пределах $k = 5-25$ Па·сⁿ, показатель нелинейности $n = 0,375-1$. Выбранный диапазон изменения параметров соответствует свойствам высокопарафинистых битумных вяжущих для различных температур [6–8]. Перепад давления варьировался в диапазоне $|dp/dx| = 100-5000$ Па/м. Радиус канала составлял $R = 0,1$ м.

На рис. 1 показаны радиальные распределения эффективной вязкости.

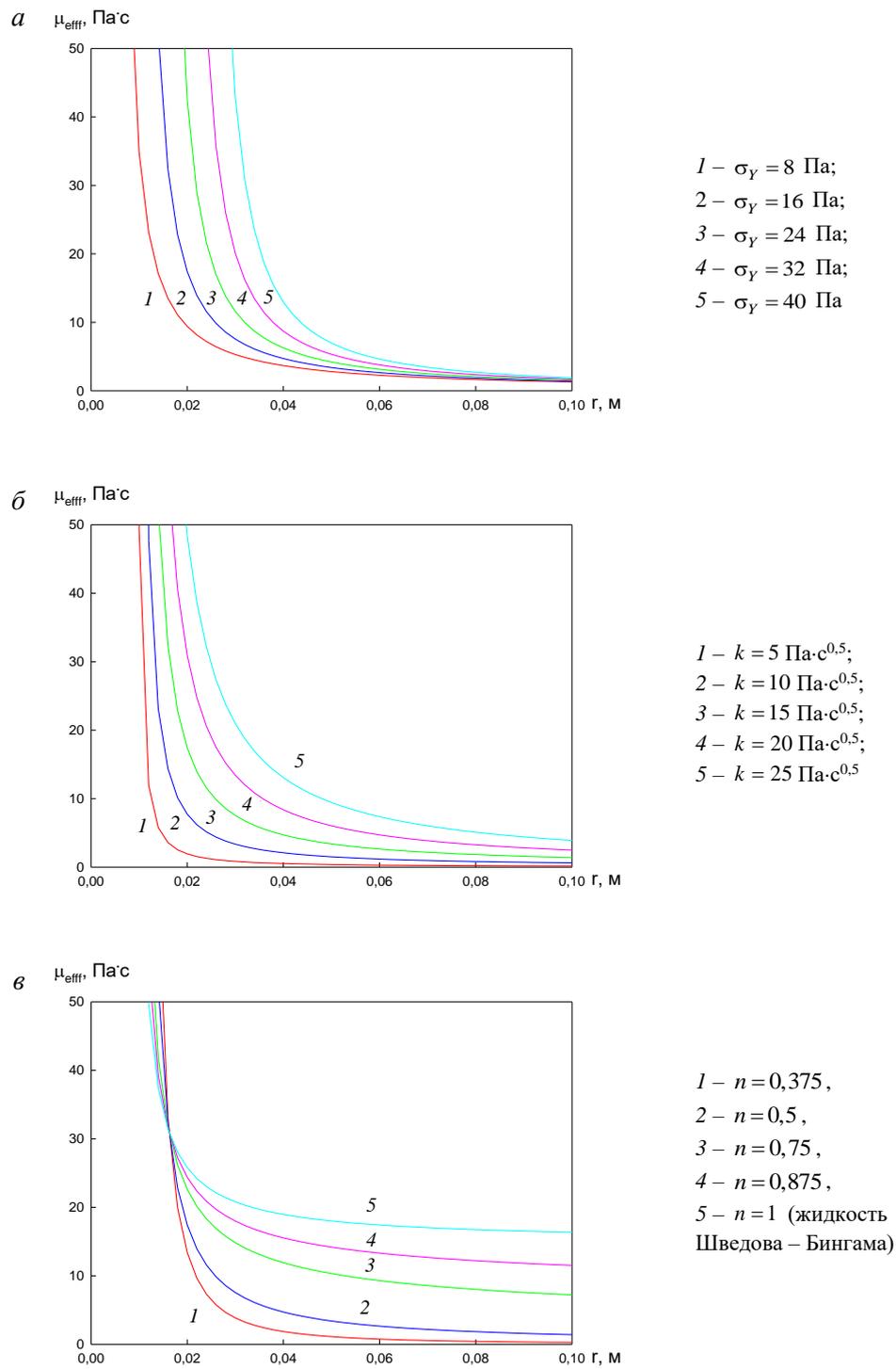


Рис. 1. Радиальное распределение эффективной вязкости μ_{eff} . $R = 0,1 \text{ м}$, $|dp/dx| = 3800 \text{ Па/м}$:
 а – $k = 15 \text{ Па}\cdot\text{c}^{0,5}$, $n = 0,5$; б – $\sigma_y = 16 \text{ Па}$, $n = 0,5$; в – $\sigma_y = 16 \text{ Па}$, $k = 15 \text{ Па}\cdot\text{c}^n$

Эти распределения являются типичными для вязкопластических сред и имеют вид гиперболы с вертикальной асимптотой на границе жесткой зоны. На границе жесткой зоны, где градиент скорости имеет невысокие значения, наблюдается значительный рост значений эффективной вязкости. В жесткой зоне ($r < r_Y$) среда находится в структурированном состоянии. В периферийной и пристеночной частях течения эффективная вязкость характеризуется низкими значениями.

С ростом значений предельного напряжения сдвига σ_Y происходит увеличение размеров жесткой зоны и смещение ее границы к стенкам трубы. В зоне сдвигового течения интенсивность скоростей сдвиговых деформаций уменьшается. Вблизи границы жесткой зоны происходит значительный рост значений эффективной вязкости (рис. 1, а). Однако в пристеночной области варьирование значений σ_Y не оказывает влияния на величину пластической вязкости μ_{eff} .

Вариация значений консистенции k не влияет на положение жесткой зоны. Увеличение значений консистенции k приводит к росту эффективной вязкости во всей области течения. Однако если в периферийной и пристеночной областях этот рост является незначительным, то вблизи границы жесткой зоны происходит существенное увеличение эффективной вязкости, связанное с загущением среды (рис. 1, б).

На рис. 1, в представлено радиальное распределение эффективной вязкости, рассчитанное для различных значений показателя нелинейности. Значения эффективной вязкости вблизи границы жесткой зоны ($r_Y < r < r_*$) возрастают с увеличением показателя нелинейности n . В пристеночной области ($r_* < r < R$), напротив, с увеличением n эффективная вязкость потока уменьшается. На удалении от оси течения $r = r_*$ величина показателя нелинейности не влияет на эффективную вязкость среды. Это условие выполняется, если интенсивность скоростей сдвиговых деформаций равна $U = U_* = 1 \text{ с}^{-1}$. Координата r_* с учетом зависимости (19) определится как

$$r_* = r_Y \left(1 + U_*^n \frac{k}{\sigma_Y} \right). \quad (22)$$

На рис. 2 показано изменение коэффициента гидравлического сопротивления ζ с ростом перепада давления $|dp/dx|$ для различных значений предельного напряжения сдвига σ_Y , консистенции k , показателя нелинейности n . Коэффициент гидравлического сопротивления при $|dp/dx| < 2\sigma_Y/R$ стремится к бесконечности: $\zeta \rightarrow \infty$, что свидетельствует о структурировании среды и невозможности течения. С увеличением значений $|dp/dx|$ гидравлическое сопротивление потока уменьшается, что связано с разрушением структуры среды, деформацией макромолекул и их ориентацией по потоку.

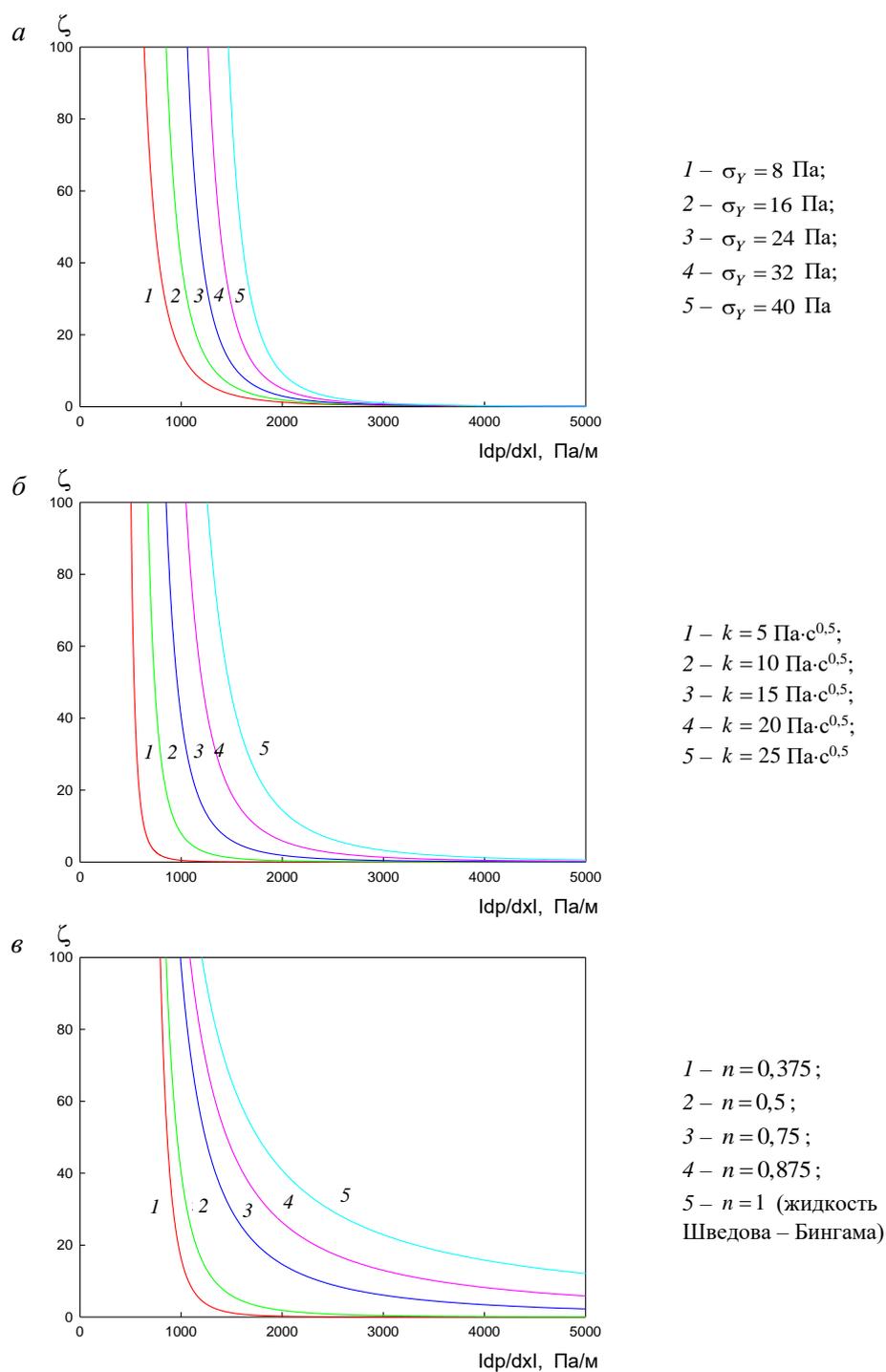


Рис. 2. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ζ от перепада давления $|dp/dx|$: $R = 0,1 \text{ м}$:

$a - k = 15 \text{ Па}\cdot\text{с}^{0,5}$; $n = 0,5$; $б - \sigma_Y = 16 \text{ Па}$, $n = 0,5$; $в - \sigma_Y = 16 \text{ Па}$, $k = 15 \text{ Па}\cdot\text{с}^n$

С увеличением предельного напряжения сдвига σ_Y кривые на рис. 2, а сдвигаются вправо. Этот факт объясняется тем, что с ростом σ_Y вклад структурной вязкости μ_{str} в рост гидравлического сопротивления возрастает. Поэтому для возникновения течения требуется приложить больший перепад давления.

С увеличением значений параметра консистенции k возрастает диссипация механической энергии потока, что приводит к росту гидравлического сопротивления (рис. 2, б). При больших перепадах давления с уменьшением параметра нелинейности n происходит уменьшение среднерасходной вязкости. В результате этого неньютоновские свойства среды приводят к уменьшению гидравлического сопротивления.

Радиальное распределение скорости потока, рассчитанное для различных значений реологических параметров, представлено на рис. 3.

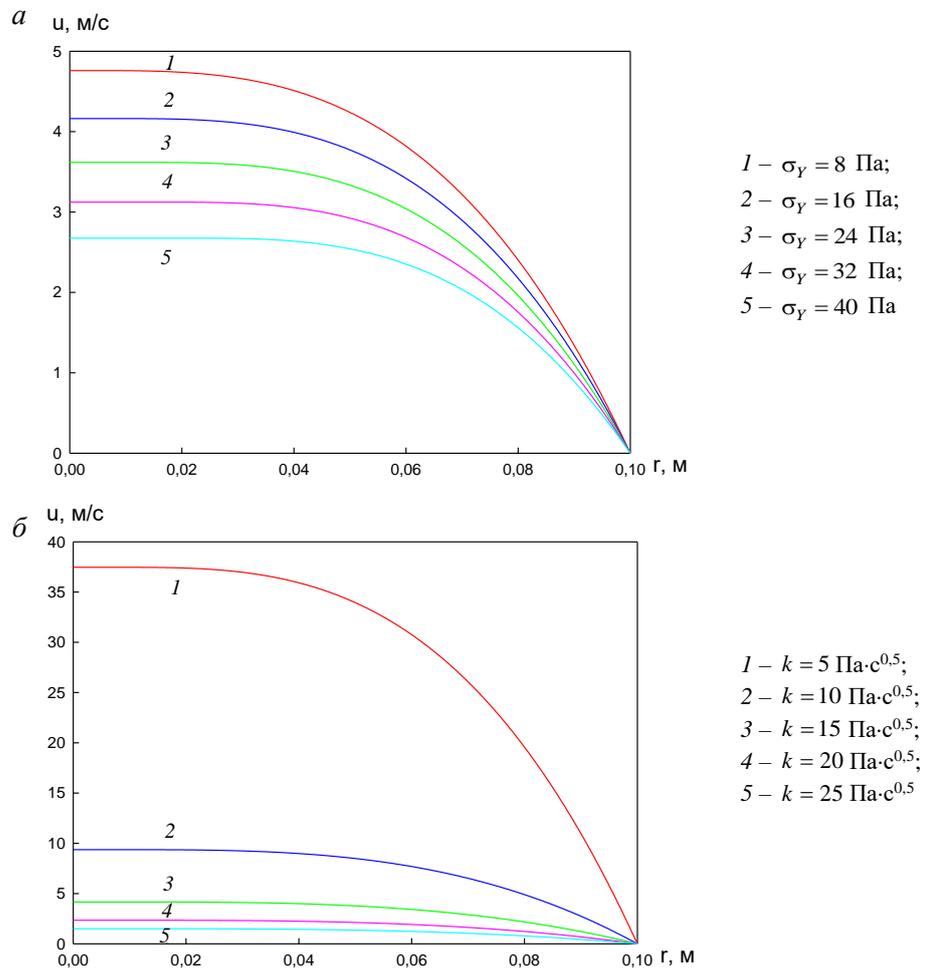


Рис. 3. Радиальное распределение скорости u : $R = 0,1 \text{ м}$, $|dp/dx| = 3800 \text{ Па/м}$ (окончание см. на с. 93):

$a - k = 15 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,5}$, $n = 0,5$; $b - \sigma_Y = 16 \text{ Па}$, $n = 0,5$

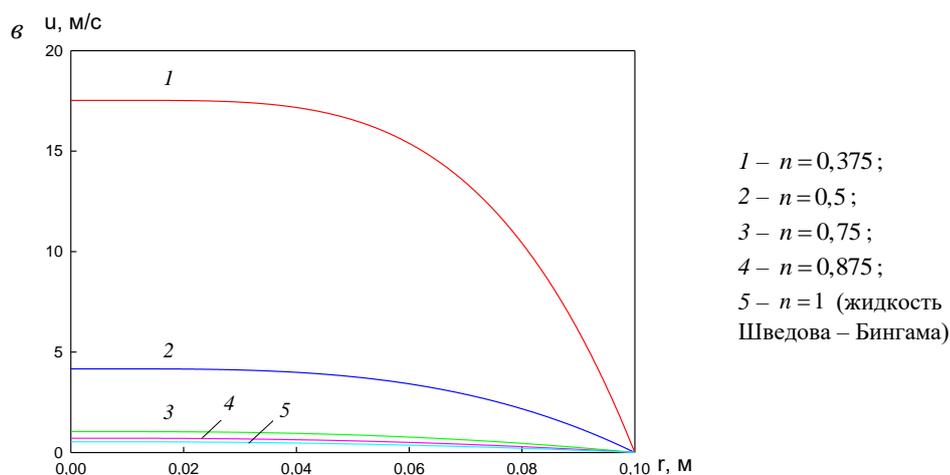


Рис. 3. Окончание (начало см. на с. 92):
 $v - \sigma_Y = 16$ Па, $k = 15$ Па·сⁿ

Характерной особенностью вязкопластических сред, наиболее заметной при низких температурах, является существование коагуляционной структуры. С ростом содержания парафинов и асфальтенов происходит увеличение предельного напряжения сдвига σ_Y , при этом увеличивается прочность коагуляционной структуры. В результате этого с ростом σ_Y расходные характеристики уменьшаются (рис. 3, а).

Содержание смол в вязущих определяет величину показателя консистенции k . Поэтому для обеспечения заданного расхода в средах, характеризующихся высокими значениями показателя консистенции, требуется приложить большой перепад давления (рис. 3, б).

Влияние нелинейности параметров среды на структуру течения иллюстрирует рис. 3, в. Результаты расчетов показывают, что с увеличением показателя нелинейности возрастает гидравлическое сопротивление, приводящее при заданном перепаде давления к уменьшению скорости потока.

Заключение

В ходе выполнения работы исследованы структура течения и гидравлические характеристики высокопарафинистого битумного вязущего и получены следующие результаты:

- структурирование среды приводит к тому, что скорость течения в ядре потока характеризуется практически однородным профилем, что свойственно пластическому течению;
- распределение эффективной вязкости имеет вид гиперболы с вертикальной асимптотой на границе жесткой зоны;
- в периферийной и пристеночной частях течения эффективная вязкость характеризуется низкими значениями; вблизи границы жесткой зоны, где градиент скорости имеет невысокие значения, наблюдается существенный рост значений эффективной вязкости;

– при низких значениях перепада давления неньютоновские свойства среды, обусловленные наличием внутренней структуры, приводят к значительному гидравлическому сопротивлению. С увеличением перепада давления гидравлическое сопротивление потока уменьшается, что связано с разрушением структуры среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Методические рекомендации* по проектированию жестких дорожных одежд. Москва : Информавтор, 2004.
2. *Технические рекомендации* по устройству и приемке в эксплуатацию дорожных покрытий с учетом требований международных стандартов по ровности. Москва, 2003.
3. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Веник В.Н., Базаров Р.Б., Арутюнян Э.Р. Математическое моделирование сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. № 4 (63). С. 158–170.
4. Бабак О.Г., Старков Г.Б. Применение модифицированных вяжущих в дорожном строительстве // *Дорожная техника и технологии*. 2001. № 5. С. 72–75.
5. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Чурилин В.С. Моделирование напряжений и деформаций дорожных покрытий // *Дороги и мосты*. 2016. № 2 (36). С. 139–153.
6. Гун Р.Б. Нефтяные битумы. Москва : Химия, 1973. 432 с.
7. Грудников И.Б. Производство нефтяных битумов. Москва : Химия, 1983. 192 с.
8. Галдина В.Д. Модифицированные битумы. Омск : СибАДИ, 2009. 228 с.
9. Галдина В.Д. Моделирование на ЭВМ подбора состава полимерно-битумного вяжущего // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2011. № 34. С. 132–138.
10. Горшенина Г.И., Михайлов Н.В. Полимербитумные изоляционные материалы. Москва : Недра, 1967. 210 с.
11. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Москва : Наука, 1974.
12. Матвиенко О.В., Унгер Ф.Г., Базуев В.П. Математические модели производственных процессов для приготовления битумных дисперсных систем. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2015.
13. Матвиенко О.В. Исследование теплообмена и формирования турбулентности во внутреннем закрученном потоке жидкости при низких числах Рейнольдса // *Инженерно-физический журнал*. 2014. Т. 87. № 4. С. 908–918.
14. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Южанова Н.К. Численное исследование перехода к турбулентному режиму течения внутренних закрученных потоков битумных вяжущих // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2013. № 2. С. 132–143.
15. Sybilski D. Non-newtonian viscosity of polymer-modified bitumens // *Materials and Structures* 1993. V. 26. P. 15–23. DOI:10.1007/BF02472233.
16. Золотарев В.А. Дорожные битумные вяжущие и асфальтобетоны. Харьков : ХНАДУ, 2014. 180 с.
17. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Дульзон Н.К., Смирнова Н.Г., Агафонова М.В. Численное исследование структуры течения и теплообмена при закрученном течении битумно-дисперсных систем в цилиндрических каналах // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2014. № 2 (43). С. 80–93.
18. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Смирнова Н.Г., Пушкарева Г.В., Дульзон Н.К. Исследование смешения коаксиальных закрученных потоков для приготовления битумных дисперсных систем // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2014. № 3 (44). С. 123–134.
19. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. Санкт-Петербург : Профессия, 2007. 560 с.
20. Кутепов А.М., Полянин Л.Д., Запрянов З.Д., Вязьмин А.В., Казенин Д.А. Химическая гидродинамика : справочное пособие. Москва : Бюро Квантум, 1996.

21. *Климов Д.М., Петров А.Г., Георгиевский Д.В.* Вязкопластические течения: динамический хаос, устойчивость и перемешивание. Москва : Наука, 2005.
22. *Матвиенко О.В.* Численное исследование течения неньютоновских жидкостей в цилиндрическом канале // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 8-2. С. 183–189.
23. *Уилкинсон У.Л.* Неньютоновские жидкости. Москва : Мир, 1964.
24. *Матвиенко О.В., Базуев В.П., Южанова Н.К.* Математическое моделирование течения закрученного потока псевдопластической жидкости в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2011. Т. 84. № 3. С. 544–547.
25. *Матвиенко О.В., Базуев В.П., Южанова Н.К.* Математическое моделирование течения закрученного потока дилатантной жидкости в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 1. С. 192–199.
26. *Матвиенко О.В., Базуев В.П., Черкасов И.С., Асеева А.Е., Веник В.Н.* Течение битумного вязущего, описываемого моделью Оствальда – де Вейля, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 171–192.
27. *Матвиенко О.В., Базуев В.П., Черкасов И.С., Литвинова А.Е.* Исследование гидравлических характеристик потока водно-песчаной суспензии в трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 2. С. 129–144.
28. *Матвиенко О.В.* Исследование установившегося течения псевдопластической жидкости, описываемой моделью Сиско, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2018. № 55. С. 99–112.
29. *Moallemi N., Shafieenejad I., Novinzadeh A.B.* Exact solutions for flow of a Sisko fluid in pipe // Special Issue of the Bulletin of the Iranian Mathematical Society. 2011. V. 37. № 2. Part 1. P. 49–60.
30. *Матвиенко О.В., Асеева А.Е.* Математическое моделирование закрученного потока термовязкой псевдопластической жидкости Сиско в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93. № 4. С. 857–869.
31. *Williamson R.V.* The Flow of Pseudoplastic Materials // Industrial and Engineering Chemistry. 1929. V. 21. № 11. P. 1108–1111.
32. *Матвиенко О.В., Евтюшкин Е.В.* Математическое исследование сепарации дисперсной фазы в гидроциклоне при очистке вязкопластических буровых растворов // Инженерно-физический журнал. 2011. Т. 84. № 2. С. 243–252.
33. *Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G.* Numerical investigation of Herschel – Bulkley fluids mixing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Advanced Materials in Construction and Engineering. Ser. «International Scientific Conference of Young Scientists: Advanced Materials in Construction and Engineering, TSUAB 2014». 2015. С. 012034.
34. *Матвиенко О.В., Базуев В.П., Дульзон Н.К.* Математическое моделирование течения закрученного потока вязкопластической жидкости в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 5. С. 1129–1137.
35. *Матвиенко О.В., Базуев В.П., Сабылина Н.Р., Асеева А.Е., Суртаева А.А.* Исследование установившегося течения вязкопластического битумного вязущего, описываемого моделью Шведова – Бингама, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 3. С. 158–177.
36. *Матвиенко О.В., Базуев В.П., Асеева А.Е.* Математическое моделирование течения закрученного потока псевдопластической жидкости Балкли – Гершеля в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. № 1. С. 215–226.
37. *Матвиенко О.В., Базуев В.П., Асеева А.Е.* Математическое моделирование течения закрученного потока дилатантной жидкости Балкли – Гершеля в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. № 6. С. 2641–2651.
38. *Колбановская А.С., Михайлов В.В.* Дорожные битумы. Москва : Транспорт, 1973. 246 с.
39. *Ширкунов А.С., Рябов В.Г., Кудинов А.В., Нечаев А.Н., Дегтянников А.С.* Взаимосвязь адгезионных свойств нефтяных дорожных битумов и содержания в них высокоплавких парафинов // Химия и технология топлив и масел. 2011. № 1. С. 36–39.

40. ГОСТ 33133–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования. Москва : Стандартинформ, 2015. 11 с.
41. Базуев В.П., Матвиенко О.В., Вороненко В.Л. Моделирование процесса модифицирования битума в кавитационно-смесительном диспергаторе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 4. С. 121–128.
42. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Туркасова Н.Г., Байгулова А.И. Исследование процесса модификации битума в инжекторном смесителе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 3. С. 202–213.
43. Матвиенко О.В., Агафонцева М.В., Базуев В.П. Исследование динамики пузырька в закрученном потоке нелинейно-вязкой жидкости // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 4. С. 144–156.
44. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Веник В.Н., Смирнова Н.Г. Численное исследование процесса образования кавитационных пузырьков в смесительном устройстве // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4 (45). С. 231–245.
45. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Веник В.Н., Смирнова Н.Г. Экспериментальное исследование процесса кавитации в технологических устройствах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 6. С. 165–176.
46. Матвиенко О.В., Эфа А.К., Базуев В.П., Евтюшкин Е.В. Численное моделирование распада турбулентной струи в спутном закрученном потоке // Известия вузов. Физика. – 2006. Т. 49. № 6. С. 96–107.

REFERENCES

1. Metodicheskie rekomendacii po proektirovaniyu zhestkih dorozhnyh odezhd [Methodological recommendations for rigid pavements]. Moscow: Informavtodor, 2004. (rus)
2. Tehnicheskie rekomendacii po ustrojstvu i priemkev jekspluataciju dorozhnyh pokrytij s uchetom trebovanij mezhdunarodnyh standartov po rovnosti [Technical recommendations on device and acceptance for operation of pavements in accord with international standards for flatness]. Moscow, 2003. Pp. 134–03. (rus)
3. Matvienko O.V., Bazuyev V.P., Venik V.N., Bazarov R.B., Arutyunyan E.R. Matematicheskoye modelirovaniye sdvigoustoychivosti asfal'tobetonnykh pokrytij avtomobil'nykh dorog [Mathematical modelling of road pavement shear-resistance]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. No. 4 (63). Pp. 158–170. (rus)
4. Babak O.G., Starkov G.B. Primeneniye modifitsirovannykh vyazhushchikh v dorozhnom stroitel'stve [Application of modified binders in road construction]. *Dorozhnaya tekhnika i tekhnologii*. 2001. No. 5. Pp. 72–75. (rus)
5. Matvienko O.V., Bazuyev V.P., Churilin V.S. Modelirovaniye napryazheniy i deformatsiy dorozhnykh pokrytij [Stress-strain state modelling of road pavements]. *Dorogi i mosty*. 2016. No. 2 (36). Pp. 139–153. (rus)
6. Gun R.P. Neftyanyye bitумы [Oil bitumen]. Moscow: Khimia, 1973. 432 p. (rus)
7. Grudnikov I.B. Proizvodstvo neftyanykh bitumov [Production of oil bitumen]. Moscow: Khimia, 1983. 192 p. (rus)
8. Galdina V.D. Modifitsirovannyye bitумы [Modified bitumen]. Omsk: SibADI, 2009. 228 p. (rus)
9. Galdina V.D. Modelirovaniye na EVM podbora sostava polimerno-bitumnogo vyazhushchego. [Computer modeling of the polymer-bitumen binder compositions]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2011. No. 34. P. 132–138. (rus)
10. Gorshenina G.I., Mikhaylov N.V. Polimerbitumnyye izolyatsionnyye materialy [Polymer bitumen insulating materials]. Moscow: Nedra, 1967. 210 p. (rus)
11. Loitsyansky L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza. [Mechanics of liquid and gas]. Moscow: Nauka, 1974. (rus)
12. Matvienko O.V., Unger F.G., Bazuev V.P. Matematicheskiye modeli proizvodstvennykh protsessov dlya prigotovleniya bitumnykh dispersnykh sistem [Mathematical models of manufacturing processes for preparation of dispersed bitumen systems]. Tomsk: TSUAB, 2015. (rus)
13. Matvienko O.V. Issledovaniye teploobmena i formirovaniya turbulentsnosti vo vnutrennem zakruchennom potoke zhidkosti pri nizkikh chislakh Reynol'dsa. [Heat transfer and formation

- of turbulence in an internal swirling fluid flow at low Reynolds numbers]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2014. V. 87. No. 4. Pp. 908–918. (rus)
14. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Yuzhanova N.K. Chislennoye issledovaniye perekhoda k turbulentnomu rezhimu techeniya vnutrennikh zakruchennykh potokov bitumnykh vyazhushchikh. [Numerical investigation of transition to the turbulent mode of internal swirl flows of bitumen binders]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 2. Pp. 132–143. (rus)
 15. Sybilski D. Non-Newtonian viscosity of polymer-modified bitumen. *Materials and Structures*. 1993. V. 26. Pp. 15–23. DOI: 10.1007/BF02472233
 16. Zolotarev V.A. Dorozhnyye bitumnyye vyazhushchiye i asfal'tobetonny [Road bituminous binders and asphalt concrete]. Kharkov, 2014. 180 p. (rus)
 17. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Dulzon N.K., Smirnova N.G., Agafonova M.V. Chislennoye issledovaniye struktury techeniya i teploobmena pri zakruchennom techenii bitumnodispersnykh sistem v tsilindricheskikh kanalakh [Numerical simulation of flow and heat transfer for bitumen dispersed systems in cylindrical channels]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 2 (43). P. 80–93. (rus)
 18. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Smirnova N.G., Pushkareva G.V., Dulzon N.K. Issledovaniye smesheniya koaksial'nykh zakruchennykh potokov dlya prigotovleniya bitumnykh dispersnykh sistem [Investigation of mixing coaxial swirl flows for the preparation of dispersed bitumen systems]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 3 (44). Pp. 123–134. (rus)
 19. Malkin A.Y., Isaev A.I. Reologiya: kontseptsii, metody, prilozheniya [Rheology: concepts, methods, applications]. Saint-Petersburg: Professia, 2007. 560 p. (rus)
 20. Kutepov A.M., Polyagin L.D., Zapryanov Z.D. Vyaz'min A.V., Kazenin D.A. Khimicheskaya gidrodinamika: spravochnoye posobiye [Chemical hydrodynamics: handbook]. Moscow: Byuro Kvantum, 1996. (rus)
 21. Klimov D.M., Petrov A.G., Georgievsky D.V. Vyazkoplasticheskiye techeniya: dinamicheskiy khaos, ustoychivost' i peremeshivaniye [Visco-plastic flows: dynamic chaos, stability and mixing]. Moscow: Nauka, 2005. (rus)
 22. Matvienko O.V. Chislennoye issledovaniye techeniya nen'yutonovskikh zhidkostey v tsilindricheskom kanale. [Numerical investigation of the flow of non-Newtonian fluids in a cylindrical channel]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*. 2014. V. 57. No. 8-2. Pp. 183–189. (rus)
 23. Wilkinson W.L. Nen'yutonovskie zhidkosti [Non-Newtonian fluids]. Moscow: Mir, 1964. (transl. from Engl.)
 24. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Yuzhanova N.K. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka psevdoplasticheskoy zhidkosti v tsilindricheskom kanale [Mathematical modeling of swirling flow of a pseudoplastic fluid in a cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2011. V. 84. No. 3. Pp. 544–547. (rus)
 25. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Yuzhanova N.K. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka dilatantnoy zhidkosti v tsilindricheskom kanale. [Mathematical modeling of swirling flow of a dilatant fluid in a cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2014. V. 87. No. 1. Pp. 192–199. (rus)
 26. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Cherkasov I.S., Litvinova A.E. Techenie bitumnogogo vyazhushchego, opisyvaemogo model'yu Ostval'da–de Veilya, v tsilindricheskoi trube [Liquid asphalt binders in cylindrical tube in terms of the Ostwald – de Waele model]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 129–144. (rus)
 27. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Cherkasov I.S., Aseeva A.E. Issledovanie gidravlicheskikh kharakteristik potoka vodno-peschanoy suspenzii v trube [Hydraulic properties of sand slurry flow in a pipe]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020. V. 22. No. 2. Pp. 171–192. (rus)
 28. Matvienko O.V. Issledovaniye ustanovivshegosya techeniya psevdoplasticheskoy zhidkosti, opisyvayemoy model'yu Sisko, v tsilindricheskoy trube. [Investigation of the steady state flow of pseudoplastic fluid described by the Sisco model in a cylindrical tube]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*. 2018. No. 55. Pp. 99–112. (rus)

29. Moallemi N., Shafteenejad I., Novinzadeh A.B. Exact solutions for flow of a Sisko fluid in pipe. *Special Issue of the Bulletin of the Iranian Mathematical Society*. 2011. V. 37 No. 2. Part 1. Pp. 49–60.
30. Matvienko O.V., Aseeva A.E. Matematicheskoye modelirovaniye zakruchennogo potoka termovyazkoy psevdoplasticheskoy zhidkosti Sisko v tsilindricheskom kanale. [Mathematical simulation of swirling flow of thermo-viscous, pseudoplastic Sisko fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2020. V. 93. No. 4. Pp. 827–838. (rus)
31. Williamson R.V. The flow of pseudoplastic materials. *Industrial and Engineering Chemistry*. 1929. V. 21. No. 11. Pp. 1108–1111.
32. Matvienko O.V., Evtyushkin E.V. Matematicheskoye issledovaniye separatsii dispersnoy fazy v gidrotsiklone pri ochistke vyazkoplasticheskikh burovykh rastvorov. [Mathematical investigation of dispersed phase separation in hydrocyclone in cleaning of visco-plastic mud]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2011. V. 84. No. 2. Pp. 243–252. (rus)
33. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G. Numerical investigation of Herschel-Bulkley fluids mixing. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Advanced Materials in Construction and Engineering. Ser. "International Scientific Conference of Young Scientists: Advanced Materials in Construction and Engineering 2014"*. 2015. 012034.
34. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Dulzon N.K. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka vyazkoplasticheskoy zhidkosti v tsilindricheskom kanale [Mathematical modeling of swirling flow of pseudoplastic fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2014. V. 87. No. 5. Pp. 1129–1137. (rus)
35. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Sabylina N.R., Aseeva A.E., Surtaeva A.A. Issledovanie ustanovivshegosya techeniya vyazkoplasticheskogo bitumnogo vyazhushchego, opisyvaemogo model'yu Shvedova – Bingama, v tsilindricheskoi tube [Shvedov-Bingham model of steady flow of visco-plastic bitumen binder in cylindrical tube]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturnostroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2019. V. 20. No. 3. Pp. 158–177. (rus)
36. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Aseeva A.E. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka psevdoplasticheskoy zhidkosti Balkli – Gershelya v tsilindricheskom kanale. [Mathematical modeling of the swirling flow of pseudoplastic Bulkley – Herschel fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2019. V. 92. No. 1. Pp. 215–226. (rus)
37. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Aseeva A.E. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka dilatantnoy zhidkosti Balkli–Gershelya v tsilindricheskom kanale [Mathematical simulation of the swirling flow of dilatant Bulkley–Herschel fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2019. V. 92. No. 6. Pp. 2641–2651. (rus)
38. Kolbanovskaya A.S., Mikhaylov V.V. Dorozhnyye bitумы [Road bitumen]. Moscow: Transport, 1973. 246p. (rus)
39. Shirkunov A.S., Ryabov V.G., Kudinov A.V., Nechayev A.N., Degtyannikov A.S. Vzaimosvyaz' adgezionnykh svoystv neftyanykh dorozhnykh bitumov i sodержaniya v nikh vysokoplavkikh parafinov. [Relationship between adhesive properties of oil road bitumen and content of high-melting paraffins]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*. 2011. No. 1. Pp. 36–39. (rus)
40. GOST 33133–2014. Dorogi avtomobil'nyye obshchego pol'zovaniya. Bitумы neftyanyye dorozhnyye vyazkiye. Tekhnicheskiye trebovaniya. [Automobile roads for general use. Viscous oil road bitumen. Technical requirements]. Moscow: Standartinform, 2015. 11 p. (rus)
41. Bazuev V.P., Matvienko O.V., Voronenko V.L. Modelirovaniye protsessa modifitsirovaniya bituma v kavitatsionno-smesitel'nom dispergatore. [Modeling of bitumen modifying process in cavitation mixing disperser]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2010. No. 4. Pp. 121–128. (rus)
42. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Turkasova N.G., Baygulova A.I. Issledovaniye protsessa modifikatsii bituma v inzhektorom smesitele. [The process for modifying bitumen in injector mixer]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 3. Pp. 202–213. (rus)
43. Matvienko O.V., Agafontseva M.V., Bazuev V.P. Issledovaniye dinamiki puzyr'ka v zakruchennom potoke nelineyno-vyazkoy zhidkosti. [Bubble dynamics in swirling flow of nonlinear viscous fluid]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. No. 4. Pp. 144–156. (rus)

44. *Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G.* Chislennoye issledovaniye protsessa obrazovaniya kavitatsionnykh puzyr'kov v smesitel'nom ustroystve. [Numerical investigation of formation of cavitation bubbles in a mixing device]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 4 (45). Pp. 231–245. (rus)
45. *Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G.* Eksperimental'noye issledovaniye protsessa kavitatsii v tekhnologicheskikh ustroystvakh. [Experimental study of the cavitation process using technological devices]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 6. Pp. 165–176. (rus)
46. *Matvienko O.V., Efa A.K., Bazuev V.P., Evtyushkin E.V.* Chislennoye modelirovaniye raspada turbulentnoy strui v sputnom zakruchennom potoke. [Numerical simulation of turbulent jet decay in wake swirling flow]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*. 2006. V. 49. No. 6. Pp. 96–107. (rus)

Сведения об авторах

Матвиенко Олег Викторович, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Литвинова Алёна Евгеньевна, аспирант, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Authors Details

Oleg V. Matvienko, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 6340036 Tomsk, Russia; National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia.

Alyona E. Aseeva, Research Assistant, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia.

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 697.34:621.397:69

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-100-111

*Ю.О. КРИВОШЕИН, Н.А. ЦВЕТКОВ, А.В. ПЕТРОВА,
А.В. ТОЛСТЫХ, Т.Н. НЕМОВА,*

Томский государственный архитектурно-строительный университет

ВОЗМОЖНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО НАСОСА В ГИДРАВЛИЧЕСКОМ КОНТУРЕ КОЛЛЕКТОРОВ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Актуальность исследования связана с необходимостью реализации концепции научно-технологического развития Российской Федерации, в которой намечен переход к экологически чистым и ресурсосберегающим технологиям.

В статье представлены результаты натурных экспериментальных исследований изменения параметров работы гибридной солнечной опытно-промышленной водонагревательной установки при прерывистых режимах работы циркуляционного насоса в гидравлическом контуре коллекторов.

Разработанный программно-аппаратный комплекс обеспечивает включение и выключение циркуляционного насоса в зависимости от разности температуры теплоносителя в коллекторах и на выходе из бака-аккумулятора. При этом обеспечивается максимально возможное получение солнечной тепловой энергии в систему при различной интенсивности солнечной инсоляции и минимальное потребление насосом электрической энергии, вырабатываемой солнечными панелями установки.

Ключевые слова: солнечная водонагревательная система; гидравлический контур с коллекторами; гидравлический насос; вакуумные трубчатые коллекторы; энергосбережение.

Для цитирования: Кривошеин Ю.О., Цветков Н.А., Петрова А.В., Толстых А.В., Немова Т.Н. Возможности энергосбережения при работе циркуляционного насоса в гидравлическом контуре коллекторов солнечных водонагревательных систем // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 100–111.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-100-111

*Yu.O. KRIVOSHEIN, N.A. TSVETKOV, A.V. PETROVA,
A.V. TOLSTYKH, T.N. NEMOVA,
Tomsk State University of Architecture and Building*

ENERGY-EFFICIENT CIRCULATING PUMP IN HYDRAULIC CIRCUIT OF SOLAR COLLECTORS OF HOT-WATER SYSTEMS

The relevance of the study is associated with the need to implement the concept of the scientific and technological development of the Russian Federation, which outlines the transition to environmentally friendly and resource-saving technologies. The paper presents the results of full-scale experiments of changes in the operating parameters of the experimental-industrial hybrid solar hot-water system with a circulating pump operating in periodic duty mode in the hydraulic circuit. The proposed hardware and software system provides switching on and switching out of the circulating pump depending on the temperature difference of the coolant in collectors and at the storage tank output. This provides the maximum thermal energy for the hot-water system at different of solar radiation intensities and the minimum power consumption by the circulating pump generated by solar panels.

Keywords: solar hot-water system; hydraulic circuit; circulating pump; vacuum tube collectors; energy saving.

For citation: Krivoshein Yu.O., Tsvetkov N.A., Petrova A.V., Tolstykh A.V., Nemova T.N. *Vozmozhnosti energosberezheniya pri rabote tsirkulyatsionnogo nasosa v gidravlicheskom konture kollektorov solnechnykh vodonagrevatel'nykh sistem* [Energy-efficient circulating pump in hydraulic circuit of solar collectors of hot-water systems]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021. V. 23. No. 4. Pp. 100–111. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-100-111

Введение

Рост мировой экономики и повышение уровня жизни неразрывно связаны с возрастанием потребности в тепловой и электрической энергии [1]. Климатические изменения, сопровождаемые возрастанием CO₂ в атмосфере, сильная зависимость многих стран от импорта топлива и ограниченность запасов углеводородов [2] приводят к необходимости получения энергии из возобновляемых источников [3]. Странами Европейского союза принято решение («Европейская зеленая сделка») обеспечить к 2050 г. нулевые выбросы парниковых газов [4].

В настоящее время все более активно используется солнечная энергия, успешно преобразуемая в электрическую и тепловую. Солнечная энергия, падающая на поверхность Земли, огромна. Так, энергия, падающая на Землю от Солнца за 1 час примерно в 100 раз больше, чем потребляется человечеством за год. Привлекательность этого возобновляемого источника связана также и с тем, что энергия Солнца доступна любой стране, т. к. она не знает границ [5] и ее использование возможно практически во всех отраслях экономики.

Значительную долю (32 %) в мировом потреблении энергии занимает строительный сектор, который, в свою очередь, является одним из основных источников изменения климата и выбросов CO₂ [6]. Использование водонагревательных систем с солнечными коллекторами для замещения солнеч-

ной энергией ископаемых видов топлива на цели отопления и горячего водоснабжения в строительном секторе возможно не только в странах с тропическим и субтропическим климатом, но и в странах, расположенных на северных территориях [5, 7]. Стоит отметить перспективность этого направления, т. к. подавляющая часть территорий России – северные.

Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации предусматривает переход к экологически чистым и ресурсосберегающим технологиям [8]. В этой связи актуальны вопросы установки и круглогодичного использования солнечных водонагревательных систем в жилищном строительстве на северных территориях с сезонно-промерзающими грунтами и на территориях с вечной мерзлотой. Однако проектирование и строительство гибридных солнечных систем горячего водоснабжения в жилых домах на северных территориях имеют существенные особенности [9] и изучены пока недостаточно [10–13].

В России реализован ряд пилотных проектов по использованию солнечной энергии в реализации концепции научно-технологического развития страны. Одним из них является строительство жилых многоквартирных домов г. Якутска, в которых были использованы энергоэффективные ограждающие конструкции и гибридные солнечные системы горячего водоснабжения, контролируемые разработанным программно-аппаратным комплексом с внешним доступом [14–17].

Целью настоящей работы является совершенствование программно-аппаратного комплекса опытно-промышленной гибридной солнечной водонагревательной установки для обеспечения получения максимально возможной энергии солнца при различной облачности за счет прерывистой работы циркуляционного насоса в гидравлическом контуре коллекторов.

Материалы и методы

Достижение поставленной цели исследований осуществлялось посредством проведения натурных исследований режимов работы опытно-промышленной солнечной водонагревательной установки (СВНУ) в составе гибридной солнечной системы горячего водоснабжения производственного цеха № 1 НПО «Внедрение энергосберегающих технологий», расположенного в с. Кафтанчиково Томского района. Схема установки и элементы СВНУ показаны на рис. 1 и 2 [9].

Падающий на коллекторы Q поток солнечной тепловой энергии измерялся датчиком солнечной инсоляции I , закрепленным на одном из двух вакуумных коллекторов.

Для измерения температуры наружного воздуха использовался датчик температуры (термометр сопротивления), расположенный рядом с датчиком солнечной инсоляции I (рис. 1). Для исключения влияния теплового излучения датчик измерения температуры наружного воздуха оснащен четырьмя вертикальными концентрическими трубчатыми экранами, изготовленными из нержавеющей стали толщиной 0,0002 м. В блоке управления 2 осуществлялись сбор данных со всех первичных датчиков, обработка, хранение и передача информации (по требованию) на сервер 3. Отсчет данных мог проводиться

с интервалом от 2 с до 1 ч. По трубопроводу 4 горячая вода из бака-аккумулятора 7 направляется к потребителю, а холодная вода поступает в бак-аккумулятор через измеритель расхода 6.

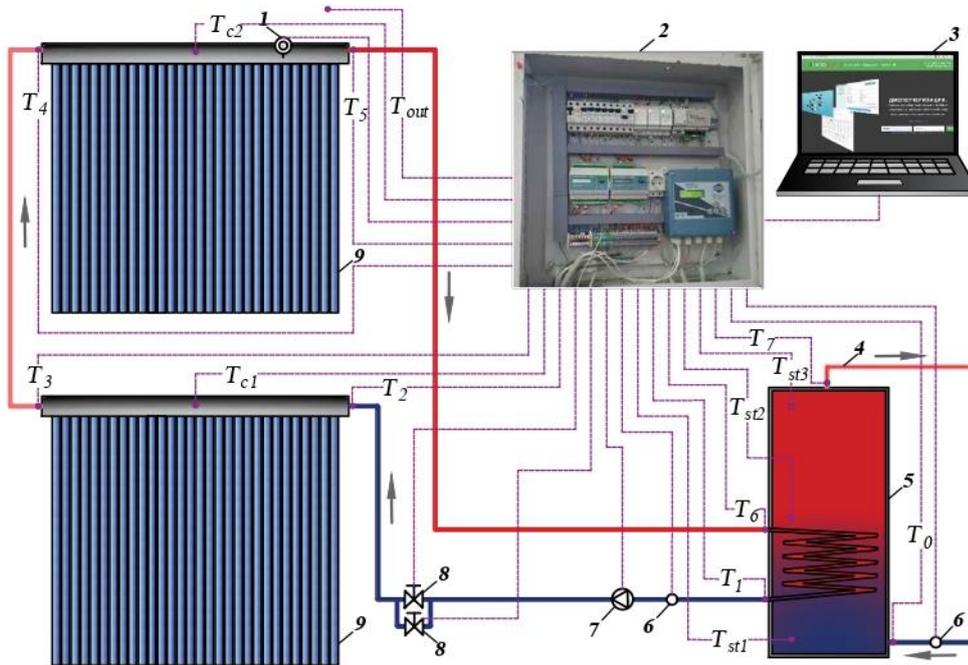


Рис. 1. Основные компоненты и используемые датчики исследуемой СВНУ:

1 – датчик солнечной инсоляции; 2 – блок управления с устройством для сбора и передачи данных; 3 – сервер; 4 – трубопровод подачи нагретой воды к потребителю; 5 – бак-аккумулятор; 6 – измеритель расхода воды; 7 – циркуляционный насос; 8 – электромагнитный клапан; 9 – коллектор



Рис. 2. Элементы СВНУ:

а – датчик солнечной инсоляции; б – циркуляционный насос

Циркуляционный насос 7 через электромагнитный клапан 8 осуществляет подачу охлажденного в бак-аккумуляторе теплоносителя (низкозамерзающая

жидкость) в вакуумные трубчатые коллекторы 9. Нагретый в них теплоноситель возвращается в теплообменник, расположенный в баке-аккумуляторе 5. Абсорбированная в коллекторах тепловая энергия через этот теплообменник передается воде, температура которой контролируется тремя датчиками, расположенными в нижней части (под теплообменником), в средней части (над теплообменником) и в верхней части бака-аккумулятора. Учет часовых поступлений тепловой энергии в бак-аккумулятор осуществляется счетчиком, расположенным в блоке управления 2, на основании измеренных значений температур теплоносителя на входе в бак-аккумулятор и на выходе из него с учетом расхода теплоносителя.

Для получения, хранения, передачи и обработки экспериментальных данных использовалась трехуровневая гетерогенная система мониторинга и управления с удаленным доступом [14–17].

Результаты и их обсуждение

Типичные зависимости изменения регистрируемых экспериментальных данных (мощности инсоляции, температуры воды в средней и нижней частях бака-аккумулятора, температуры теплоносителя в коллекторах) в течение суток с интервалом в 30 мин приведены на рис. 3.

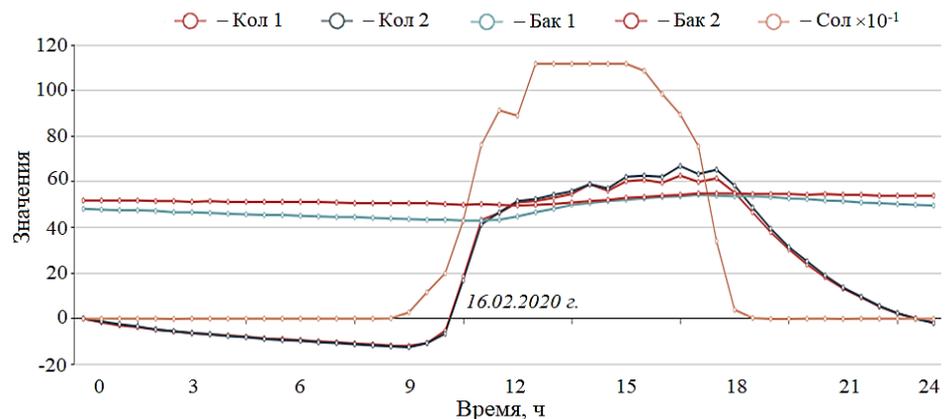


Рис. 3. Типичные суточные экспериментальные данные работы СВНУ

Значения показаний датчика солнечной инсоляции уменьшены в 10 раз, что позволило отображать все данные на одной шкале. Из рисунка следует, что разность температур воды в нижней и средней частях бака-аккумулятора в течение суток изменяется и достигает максимального значения при открытии соленоидного клапана 8 (см. рис. 1) и включении циркуляционного насоса в 11 ч утра. По мере нагревания воды в баке-аккумуляторе регистрируемая разность температур воды уменьшается практически до 0 °С при уровне солнечной инсоляции 565 Вт/м² (данные для 16 февраля 2020 г.). Затем с течением времени разность температур воды в нижней и средней частях бака-аккумулятора увеличивается (рис. 3) при непрерывной работе циркуляционного насоса.

В связи с этим представляет интерес рассмотрение вопроса изменения режима работы циркуляционного насоса в гидравлическом контуре коллекторов таким образом, чтобы использовать максимально возможную энергию солнца при различной облачности. Одним из возможных путей решения этой задачи является введение прерывистого режима работы циркуляционного насоса в комплексе опытно-промышленной гибридной солнечной водонагревательной установки.

Для анализа возможности повышения энергосбережения при изменении режима работы циркуляционного насоса регистрация экспериментальных данных выполнялась с интервалом в 30 с (рис. 4–9). Исследования проводились 3 и 26 марта 2020 г. для разной облачности.

На рис. 4 и 5 приведены данные по изменению плотности солнечной радиации ($\text{Вт}/\text{м}^2$) в течение суток 3 марта (значительная солнечная инсоляция, рис. 4) и 26 марта (облачная погода, рис. 5) 2020 г.

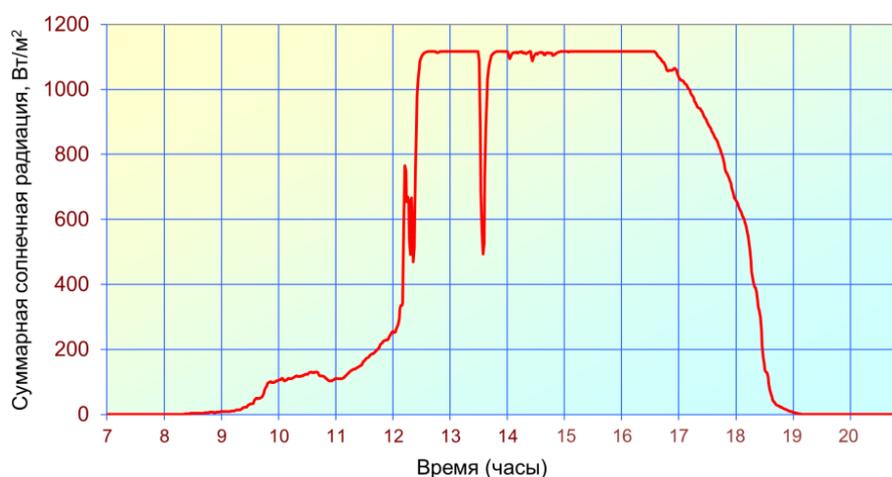


Рис. 4. Суммарная солнечная радиация ($\text{Вт}/\text{м}^2$) в зависимости от времени (03.03.2020)

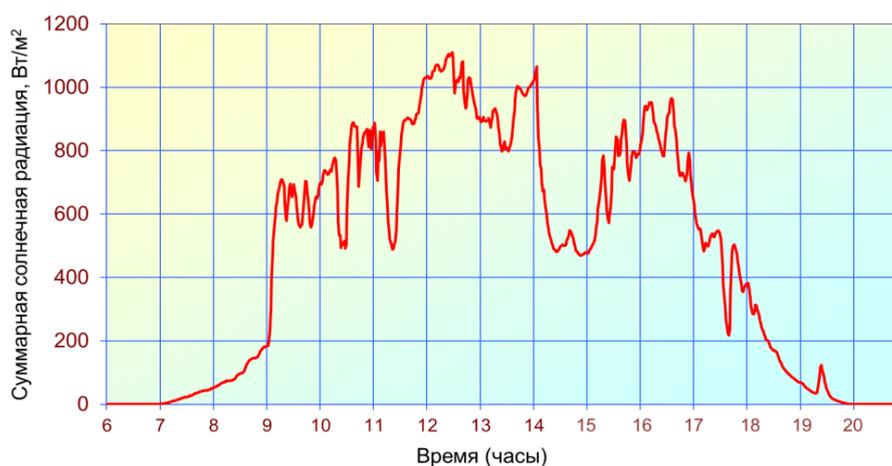


Рис. 5. Суммарная солнечная радиация ($\text{Вт}/\text{м}^2$) в зависимости от времени (26.03.2020 г.)

Так как теплоноситель поступает в среднюю часть бака-аккумулятора, то, с одной стороны, температура теплоносителя должна быть выше температуры воды в средней части бака, чтобы нагревать, а не охлаждать воду. С другой стороны, чем ниже будет температура теплоносителя, поступающего в коллекторы, тем меньшими будут тепловые потери и более интенсивным теплоперенос к теплоносителю в конденсаторах тепловых трубок.

Таким образом, чтобы обеспечить максимальный отбор тепловой энергии к теплоносителю при различной облачности, необходимо уменьшать расход теплоносителя при уменьшении солнечной инсоляции.

При безоблачной погоде и максимальной солнечной инсоляции необходимо стабильно обеспечивать максимальный расход теплоносителя, что возможно реализовать при прерывистой работе циркуляционного насоса.

Если температура теплоносителя в первом по ходу теплоносителя коллекторе (см. рис. 1) после ночного охлаждения и восхода солнца утром превысит температуру воды в нижней части бака-аккумулятора на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, то открывается соленоидный клапан и включается циркуляционный насос. При этом резко охлаждается теплоноситель в обоих коллекторах, как видно из рис. 6, на котором приведены зависимости температур теплоносителя в коллекторах, воды в баке-аккумуляторе и наружного воздуха от времени для 03.03.2020 г.

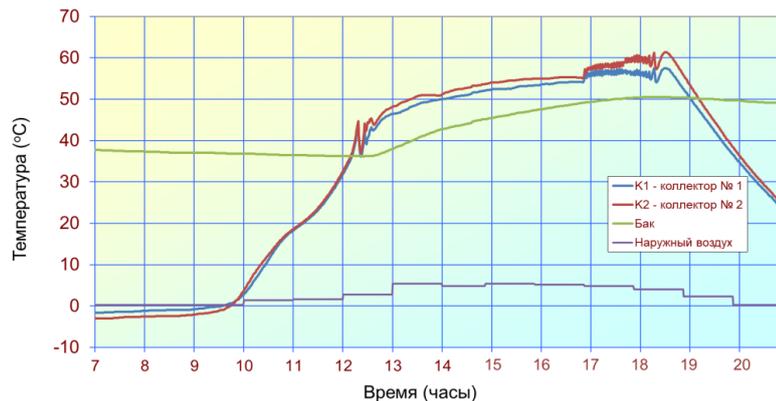


Рис. 6. Зависимость температур теплоносителя в коллекторах, воды в баке-аккумуляторе и наружного воздуха от времени (03.03.2020 г.)

При установлении температуры теплоносителя в первом по ходу движения теплоносителя коллекторе на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше температуры воды в нижней части бака-аккумулятора циркуляционный насос отключается и оба коллектора нагреваются. После нескольких колебаний температуры теплоносителя в коллекторах насос больше не выключается. На рис. 6 этот режим наблюдается с 12 ч 40 мин до 16 ч 50 мин.

Затем прерывистая работа циркуляционного насоса возобновляется. Из-за снижения солнечной инсоляции (см. рис. 4) колебания температуры теплоносителя в коллекторах увеличиваются вплоть до времени перехода работы установки в ночной режим (циркуляционный насос выключен, и соленоидный

клапан закрыт). При этом теплоноситель в обоих коллекторах начинает постепенно охлаждаться после 18 ч 30 мин.

Накопленный архив часовых расходов теплоносителя с 12 до 19 ч представлен на рис. 7.

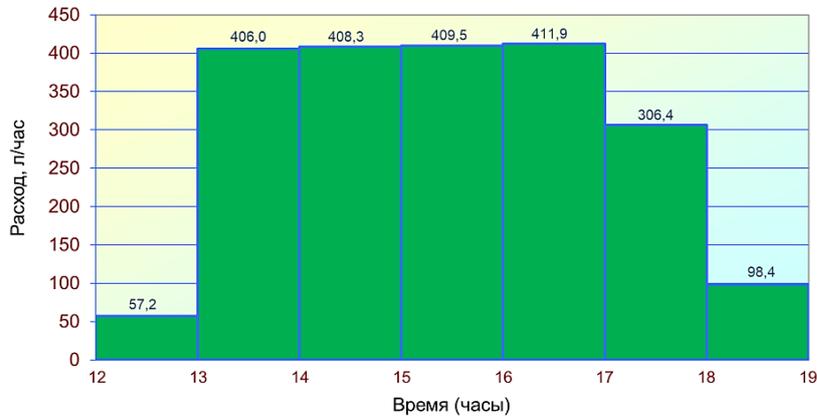


Рис. 7. Средний расход теплоносителя (л/ч) в зависимости от времени (03.03.2020 г.)

Анализ данных, представленных на рис. 6 и 7, показывает, что циркуляционный насос работал непрерывно в течение 4 ч. За это время через коллекторы было прокачано 1635,7 л теплоносителя (в среднем по 408,93 л/ч). Если бы насос работал все 7 ч со средним расходом, то через коллекторы было бы прокачано 2862,5 л. Реально же прокачано всего 2097,7 л. Отсюда следует, что насос работал только 73,3 % времени. Учитывая то, что в первые мгновения после запуска насоса расходуется больше электроэнергии, максимально возможная экономия может составить 26,7 %.

Для облачной погоды (рис. 5) регистрируется значительно большее число отключений циркуляционного насоса (рис. 8), чем для повышенной инсоляции, в связи с чем часовые расходы теплоносителя были меньше (рис. 9).

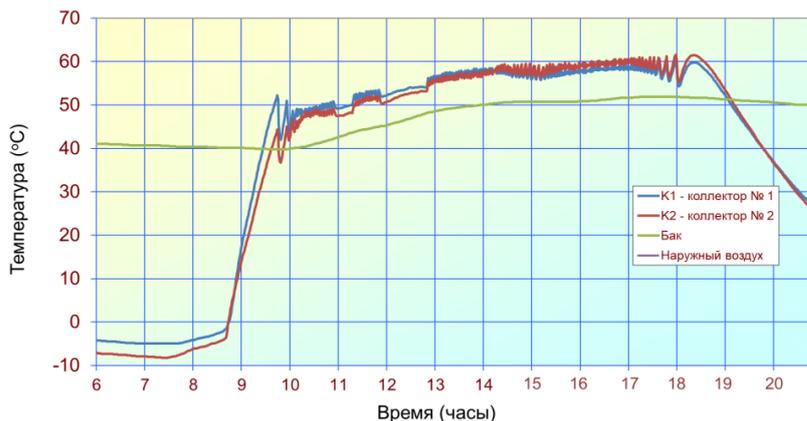


Рис. 8. Зависимость температур теплоносителя в коллекторах и воды в баке от времени (26.03.2020 г.)

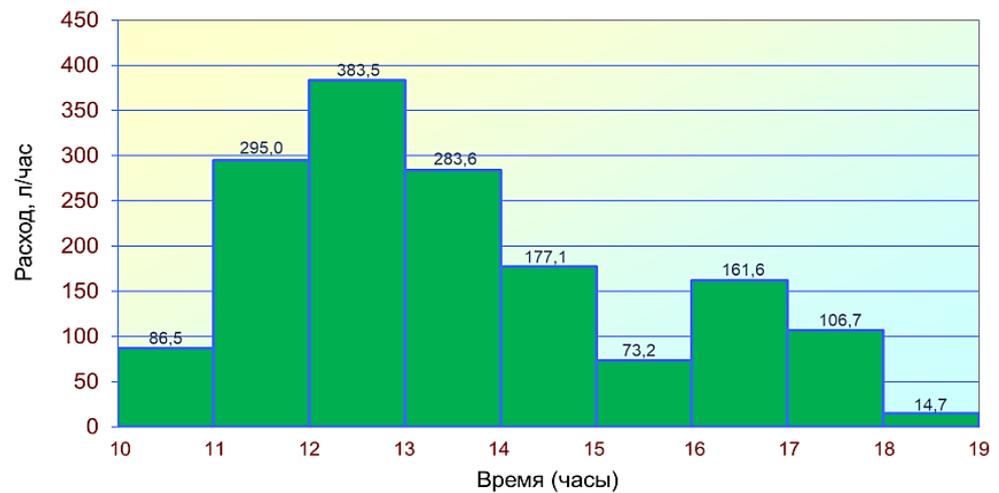


Рис. 9. Расход теплоносителя (л/ч) в зависимости от времени (часы) (26.03.20 г.)

Анализ данных, представленных на рис. 9, показывает, что за 9 ч циркуляционным насосом через коллекторы было прокачано 1581,9 л теплоносителя. Если бы насос работал все 9 ч со средним расходом 408,93 л/ч, то через коллекторы было бы прокачано 3680,4 л. Отсюда следует, что насос работал только 42,98 % времени. Максимально возможная экономия электроэнергии в этом случае может составить 57,02 %.

Выводы

Предложен способ управления циркуляционным насосом в гидравлических контурах коллекторов гибридных солнечных систем горячего водоснабжения (ГВС), позволяющий получать близкую к максимально возможной тепловую солнечную энергию в бак-аккумулятор при максимально возможной экономии электрической энергии на привод насоса от солнечных панелей.

Необходимо выполнить аналогичные исследования с частотным регулированием скорости вращения оси насоса в зависимости от интенсивности солнечной инсоляции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Avtar R., Tripathi S., Aggarwal A.K., Kumar P. Population – urbanization – energy nexus: A review // Resources. 2019. V. 8. P. 136. DOI: 10.3390/resources8030136
2. Казанджан Б.И. Системы солнечного теплоснабжения // Энергия: экономика, техника, экология. 2005. № 12. С. 10–16.
3. Афанасьев А.А., Баранов Н.Н. Мировая энергетика: глобальные проблемы и перспективы развития // Энергия: экономика, техника, экология. 2021. № 2. С. 28–47. DOI: 10.7868/S023336192102004X
4. Peña-Ramos J.A., Bagus P., Amirov-Belova D. The North Caucasus Region as a Blind Spot in the «European Green Deal»: Energy Supply Security and Energy Superpower Russia // Energies. 2021. 14. 17. URL: <https://dx.doi.org/10.3390/en14010017>
5. Haukkala T. Does the sun shine in the High North? Vested interests as a barrier to solar energy deployment in Finland // Energy Research & Social Science. 2015. № 6. P. 50–58.

6. *Abikoye B., Čuček L., Isafiade A.J., Kravanja Z.* Synthesis of solar thermal network for domestic heat utilization // *Chemical Engineering Transactions*. 2019. № 76. P. 1015–1020.
7. *Полищук С.З., Шамрицкая Л.А.* Возможности использования солнечной энергии для отопления и горячего водоснабжения зданий в северных широтах // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2012. № 4(169). С. 26–31.
8. *Российская Федерация. Президент.* О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642 // Президент Российской Федерации [официальный сайт]. URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/41449> (дата обращения 18.03.2021 г.).
9. *Кривошеин Ю.О., Цветков Н.А., Толстых А.В., Хуторной А.Н., Колесникова А.В., Петрова А.В.* Эффективная солнечная система горячего водоснабжения для северных территорий // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2020. Т. 22. № 6. С. 119–131. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-119-131
10. *Krivoshein Y.O., Tolstykh A.V., Tsvetkov N.A., Khutornoy A.N.* Efficiency of dual hot water systems with the use of solar evacuated tube collectors in the Northern territories // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. V. 408. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012011>
11. *Krivoshein Y.O., Tolstykh A.V., Tsvetkov N.A., Khutornoy A.N.* Mathematical model for calculating solar radiation on horizontal and inclined surfaces for the conditions of Yakutsk // *SEWAN-2019 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. 408. 012002. DOI: 10.1088/1755-1315/408/1/012002
12. *Tsvetkov N.A., Krivoshein Y.O., Khutornoi A.N., Boldyryev S., Petrova A.V.* Development of the Computer-Aided Application for the Use of Solar Energy in the Hot Water Supply System of Russian Permafrost Regions // *Chemical Engineering Transactions*. 2020. 81. P. 943–948. DOI: 10.3303/CET2081158
13. *Tsvetkov N.A., Krivoshein U.O., Tolstykh A.V., Khutornoi A.N., Boldyryev S.* The calculation of solar energy used by hot water systems in permafrost region: An experimental case study for Yakutia // *Energy*. 2020. V. 210. 118577. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118577>
14. *Цветков Н.А., Кривошеин Ю.О., Хуторной О.Ю.* Технология управления параметрами работы инженерных систем строительных объектов с удаленным доступом (на примере ТГАСУ) // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2013. № 2. С. 326–336.
15. *Кривошеин Ю.О., Цветков Н.А.* Система диспетчерского контроля и управления потреблением энергоресурсов объектами с функцией удаленного доступа // *Современные техника и технологии : сб. материалов XIX Международной конференции студентов и молодых ученых (СТТ-2013)*, Томск, 12–16 апреля 2013 г. Томск : Из-во Национального исследовательского Томского политехнического университета, 2013. С. 231–232.
16. *Цветков Н.А., Кривошеин Ю.О., Хуторной А.Н., Колесникова А.В., Саврасов Ф.В.* Автоматизированная гетерогенная система диспетчеризации и управления потреблением энергоресурсов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2015. № 5. С. 138–150.
17. *Кривошеин Ю.О., Хуторной А.Н., Цветков Н.А.* Гетерогенная ИТ-система диспетчеризации – как основа контроля, учета, мониторинга и управления энергоресурсопотреблением в многоквартирных жилых домах // *Актуальные проблемы современности*. 2016. № 2 (12). С. 173–179.

REFERENCES

1. *Avtar R., Tripathi S., Aggarwal A.K., Kumar P.* Population – urbanization – energy nexus: A review. *Resources*. 2019. V. 8. P. 136. DOI: 10.3390/resources8030136
2. *Kazandzhan B.I.* Sistemy solnechnogo teplosnabzheniya [Solar heating systems]. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*. 2005. No. 12. Pp. 10–16. (rus)
3. *Afanas'ev A.A., Baranov N.N.* Mirovaya energetika: global'nye problemy i perspektivy razvitiya [World energy: global problems and development prospects]. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*. 2021. No. 2. Pp. 28–47. DOI: 10.7868/S023336192102004X (rus)

4. Peña-Ramos J.A., Bagus P., Amirov-Belova D. The North Caucasus region as a blind spot in the “European Green Deal”: Energy supply security and energy superpower Russia. *Energies*. 2021. 14. 17. DOI: 10.3390/en 14010017
5. Haukkala T. Does the sunshine in the High North? Vested interests as a barrier to solar energy deployment in Finland. *Energy Research & Social Science*. 2015. No. 6. Pp. 50–58.
6. Abikoye B., Čuček L., Isafiade A.J., Kravanja Z. Synthesis of solar thermal network for domestic heat utilization. *Chemical Engineering Transactions*. 2019. No. 76. Pp. 1015–1020.
7. Polishchuk S.Z., Shamritskaya L.A. Vozmozhnosti ispol'zovaniya solnechnoi energii dlya otopeniya i goryachego vodosnabzheniya zdaniy v severnykh shirotakh [Possibilities of using solar energy for hot water supply of buildings in northern territories]. *Visnik Pridniprovs'koï derzhavnoï akademii budivnitsva ta arkhitekturi*. 2012. No. 4 (169). Pp. 26–31. (rus)
8. Rossiiskaya Federatsiya. Prezident o Strategii nauchno-tehnologicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii: Ukaz Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 01.12.2016 g. N 642 [Russian Federation. President on the strategy for scientific and technological development of the Russian Federation: President's Decree N 642 of 01.12.2016]. Available: <http://kremlin.ru/acts/bank/41449> (accessed March 18, 2021). (rus)
9. Krivoshein Yu.O., Tsvetkov N.A., Tolstykh A.V., Khutornoi A.N., Kolesnikova A.V., Petrova A.V. Effektivnaya solnechnaya sistema goryachego vodosnabzheniya dlya severnykh territorii [Effective solar hot water system for northern territories]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020. V. 22. No. 6. Pp. 119–131. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-119-131 (rus)
10. Krivoshein Y.O., Tolstykh A.V., Tsvetkov N.A., Khutornoi A.N. Efficiency of dual hot water systems with the use of solar evacuated tube collectors in the Northern territories. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. V. 408. DOI: 10.1088/1755-1315/408/1/012011
11. Krivoshein Y.O., Tolstykh A.V., Tsvetkov N.A., Khutornoi A.N. Mathematical model for calculating solar radiation on horizontal and inclined surfaces for the conditions of Yakutsk. *SEWAN-2019 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. V. 408. 012002. DOI: 10.1088/1755-1315/408/1/012002
12. Tsvetkov N.A., Krivoshein Y.O., Khutornoi A.N., Boldyryev S., Petrova A.V. Development of the computer-aided application for the use of solar energy in the hot water supply system of Russian permafrost regions. *Chemical Engineering Transactions*. 2020. V. 81. Pp. 943–948. DOI: 10.3303/CET2081158
13. Tsvetkov N.A., Krivoshein U.O., Tolstykh A.V., Khutornoi A.N., Boldyryev S. The calculation of solar energy used by hot water systems in permafrost region: An experimental case study for Yakutia. *Energy*. 2020. V. 210. 118577. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118577
14. Tsvetkov N.A., Krivoshein Yu.O., Krivoshein O.Yu. Tekhnologiya upravleniya parametrami raboty inzhenernykh sistem stroitel'nykh ob"ektov s udalennym dostupom (na primere TGASU) [Technology for parameter control of engineering systems of construction facilities with remote access (the TSUAB case studies)]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 2. Pp. 326–336. (rus)
15. Krivoshein Yu.O., Tsvetkov N.A. Sistema dispetcherskogo kontrolya i upravleniya potrebleniyem energoresursov ob"ektami s funktsiei udalennogo dostupa [Control and management systems of energy consumption of facilities with remote access function]. *Sovremennye tekhnika i tekhnologii: sb. materialov XIX Mezhdunarodnoi konferentsii studentov i molodykh uchennykh (Proc. 19th Int. Sci. Conf. 'Modern Engineering and Technologies')*, Tomsk: TPU, 2013. Pp. 231–232. (rus)
16. Tsvetkov N.A., Krivoshein Yu.O., Khutornoi A.N., Kolesnikova A.V., Savrasov F.V. Avtomatizirovannaya geterogennaya sistema dispetcherizatsii i upravleniya potrebleniyem energoresursov [Automated heterogeneous system of dispatching and control of energy consumption]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 5. Pp. 138–150. (rus)
17. Krivoshein Yu.O., Khutornoi A.N., Tsvetkov N.A. Geterogennaya IT-sistema dispetcherizatsii – kak osnova kontrolya, ucheta, monitoringa i upravleniya energoresursopotrebleniyem v mnogokvartirnykh zhilykh domakh [Heterogeneous dispatching IT-system as a basis for control, accounting, monitoring and management of energy consumption in apartment buildings]. *Aktual'nye problemy sovremennosti*. 2016. No. 2 (12). Pp. 173–179. (rus)

Сведения об авторах

Кривошеин Юрий Олегович, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, krivoshein@npowest.ru

Цветков Николай Александрович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, nac.tsuab@yandex.ru

Петрова Алена Владимировна, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, pvapnn@mail.ru

Толстых Александр Витальевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sinvintie@rambler.ru

Немова Татьяна Николаевна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tatyana.nemova.0702@yandex.ru

Authors Details

Yurii O. Krivoshein, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, krivoshein@npowest.ru

Nikolai A. Tsvetkov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, nac.tsuab@yandex.ru

Alena V. Petrova, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, pvapnn@mail.ru

Aleksandr V. Tolstykh, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, sinvintie@rambler.ru

Tat'yana N. Nemova, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, tatyana.nemova.0702@yandex.ru

УДК 697.1

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-112-119

*А.Н. БЕЛОУС¹, Л.З. КУЛУМБЕГОВА², О.Е. БЕЛОУС¹,**¹Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,**²Юго-Осетинский государственный университет им. А.А. Тибилова*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТИ МАЛОИНЕРЦИОННЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

В статье на примере расчета теплоустойчивости сэндвич-панели в летний период года поднимается вопрос о несовершенстве теории теплоустойчивости.

На основании выполненного сравнительного анализа алгоритма расчета внутреннего теплоусвоения материала определены главные различия методик расчета. Приводятся результаты расчета согласно классической теории и инженерной нормативной методике, а также результаты численного моделирования в программном комплексе ELCUT 6.4. Произведен сравнительный анализ амплитуды колебания температуры на внутренней поверхности сэндвич-панели.

Приведены аргументы о необходимости дальнейшего изучения нестационарного режима теплопередачи относительно ограждающих конструкций.

Ключевые слова: теплоустойчивость; нестационарная теплопередача; ограждающие конструкции.

Для цитирования: Белоус А.Н., Кулумбегова Л.З., Белоус О.Е. Определение теплоустойчивости малоинерционных ограждающих конструкций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 112–119.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-112-119

*A.N. BELOUS¹, L.Z. KULUMBEGOVA², O.E. BELOUS¹,**¹Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,**²South Ossetian State University*

HEAT STABILITY OF LOW-INERTIA BUILDING ENVELOPES

The paper deals with the problem of imperfection of the theory of heat stability based on the analysis of heat stability of sandwich panels in the summer period. Different methods of calculation of the heat stability are proposed based on the comparative analysis of the material inner heat absorption. Calculations are conducted in accordance with the classical theory and engineering normative procedure and using the results of numerical simulation in ELCUT Pro 6. 4 software. The comparative analysis is given to the temperature fluctuation amplitude on the inner surface of a sandwich panel. Further research is required for the non-stationary mode of heat transfer in building envelopes.

Keywords: heat stability; non-stationary heat transfer; building envelopes.

For citation: Belous A.N., Kulumbegova L.Z., Belous O.E. Opredelenie teploustoichivosti maloinertsionnykh ograzhdayushchikh konstruksii [Heat stability of low-inertia building envelopes]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 4. Pp. 112–119.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-112-119

Введение

Нельзя отрицать, что XXI в. – это, прежде всего, век скорости, которая правит и навязывает всем правила игры. Скорость правит не только в современных высокотехнологичных отраслях, таких как мультимедиа, производство и транспортировка, но и все чаще в отраслях, которые всегда были консервативны, – медицина и строительство. В строительной отрасли при выборе конструктивного решения и материалов заказчики отдают предпочтение тем, которые позволяют сократить срок строительства. В большинстве случаев в качестве наружных ограждающих конструкций применяются сэндвич-панели, которые обладают рядом положительных факторов: быстрота и простота монтажа, высокое сопротивление теплопередаче, небольшая цена, большая цветовая гамма и минимальные затраты на обслуживание в период эксплуатации. Однако не стоит забывать, что данная конструкция обладает малой тепловой инерцией $D = 0,4 \dots 0,6$.

Теоретические основы для расчета теплоустойчивости ограждающих конструкций заложили в своих трудах ученые К.Ф. Фокин [1] и В.Н. Богословский [2]. На основании предложенной теории теплоустойчивости были разработаны инженерные методы расчета.

Большой вклад в вопросы теплоустойчивости внес А.М. Шкловер в 60-х гг. XX в. В своих трудах он решил многие задачи, связанные с теплоустойчивостью ограждающих конструкций. В частности, была определена зависимость между конструктивным решением стен и теплоустойчивостью [3, 4].

Развитие методики расчета теплоустойчивости продолжили в своих трудах современные российские ученые [5–9], которые предложили различные подходы к решению отдельных задач. Некоторыми аспектами нестационарного режима наружных ограждающих конструкций в летний период занимались и зарубежные ученые [10–12].

В статьях [13, 14] отмечается, что при натурных исследованиях и компьютерном моделировании нестационарного процесса теплопередачи в ограждающих конструкциях получены результаты, не соответствующие теоретическим расчетам, согласно классической теории теплопередачи и инженерного метода расчета [15].

Целью настоящего исследования является корректировка существующей нормативной методики расчета теплоустойчивости ограждающих конструкций в летний период года.

Методы

Основным показателем теплоустойчивости наружных ограждающих конструкций является амплитуда колебания температуры на внутренней поверхности A , K . Амплитуда колебания на внутренней поверхности находится как отношение расчетной амплитуды колебания температуры наружного воздуха $A_{\text{расч}}$, K , к коэффициенту затухания амплитуды в ограждающей конструкции V .

Определение величины расчетной амплитуды колебания температуры наружного воздуха не вызывает сложностей, т. к. она зависит от климатиче-

ских параметров: максимальной суточной амплитуды колебания температуры, максимальной и средней солнечной радиации и коэффициента теплоотдачи наружной поверхности в летний период. Коэффициент затухания амплитуды температуры равен

$$\nu = 0,9e^{\frac{D}{\sqrt{2}}} \frac{(s_1 + \alpha_B)(s_2 + Y_1) \dots (s_i + Y_{i-1})(s_{N-1} + Y_{N-2})(\alpha_H + Y_N)}{(s_1 + Y_1)(s_2 + Y_2) \dots (s_i + Y_i)(s_N + Y_N)\alpha_H}, \quad (1)$$

где s – теплоусвоение материала Y , Вт/(м²·К); D – тепловая инерция материала; Y – теплоусвоение внутренней поверхности материала, Вт/(м²·К).

Однако при определении теплоусвоения внутренней поверхности в ограждающей конструкции необходимо использовать алгоритм, который учитывает тепловую инерцию. При этом у авторов [15] и [1, 2] в алгоритме есть большое различие между определением внутренней поверхности относительно конструкций с суммарным коэффициентом тепловой инерции меньше 1.

Алгоритм расчета теплоусвоения поверхности слоя:

1. Слой резких колебаний полностью расположен в слое ограждения. Это будет в том случае, если показатель тепловой инерции слоя $D_1 = R_1 s_1 \geq 1$, соответственно теплоусвоение внутренней поверхности ограждения будет равно коэффициенту теплоусвоения материала первого слоя, т. е. $Y_B = s_1$.

2. Показатель тепловой инерции i -го слоя $D_i = R_i s_i < 1$, тогда:

$$\text{– для первого слоя } Y_1 = \frac{R_1 s_1^2 + \alpha_B}{1 + R_1 \alpha_2}; \quad (2)$$

$$\text{– для } i\text{-го слоя } Y_i = \frac{R_i s_i^2 + Y_{i-1}}{1 + R_i Y_{i-1}}. \quad (3)$$

3. Конструкция малоинерционная $\sum_{i=1}^n D_i < 1$ – в нормативных документах

[15] отсутствуют рекомендации, и последний n -й слой рассчитывается согласно формуле (3). У авторов [1–4, 6, 13] предлагается вести расчет последнего n -го слоя с учетом коэффициента теплоотдачи наружной поверхности:

$$Y_n = \frac{R_n s_n^2 + \alpha_H}{1 + R_n \alpha_H}. \quad (4)$$

Для подтверждения или опровержения правильности третьего пункта алгоритма возможно провести лабораторные исследования конструкций с малой инерционностью или смоделировать нестационарный процесс теплопередачи в программном комплексе ELCUT 6.4, который дает большую достоверность при расчетах ограждающих конструкций с теплопроводными включениями [13].

Результаты исследования

Рассмотрим в качестве наружной ограждающей конструкции сэндвич-панель, используемую в г. Цхинвале. Климатические параметры для июля: ГСОП – 2741, средняя температура наружного воздуха – 22 °С, максимальная амплитуда колебания температуры наружного воздуха – 19,9 °С, максимальная солнечная радиация – 748 Вт/м², средняя солнечная радиация – 175 Вт/м², скорость ветра – 4,5 м/с.

Согласно [15], требуемое сопротивление теплопередаче для стен $R = 2,02 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$, исходя из этого принимаем толщину сэндвич-панели, с коэффициентом теплопередаче утеплителя $\lambda = 0,045 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, равной 90 мм. Толщины наружного и внутреннего профилированного листа равны 0,8 мм.

Для данной конструкции произведем расчет теплотехнических показателей двумя методиками, результаты расчета представлены в таблице.

Результаты расчета теплотехнических показателей сэндвич-панели в летний период

Теплотехнический показатель	Согласно методике [15]	Согласно методике [1, 2]
Теплоусвоение внутренней поверхности слоя № 1, Вт/(м ² ·К)	8,90	8,90
Теплоусвоение внутренней поверхности слоя № 2, Вт/(м ² ·К)	0,48	0,48
Теплоусвоение внутренней поверхности слоя № 3, Вт/(м ² ·К)	0,69	24,90
Коэффициент затухания амплитуды температуры	16,58	27,11
Амплитуда температуры на внутренней поверхности, °С	1,83	1,12

Произведем моделирование воздействия нестационарного теплового потока на сэндвич-панель в программном комплексе ELCUT 6.4. Результаты моделирования представлены на рисунке.

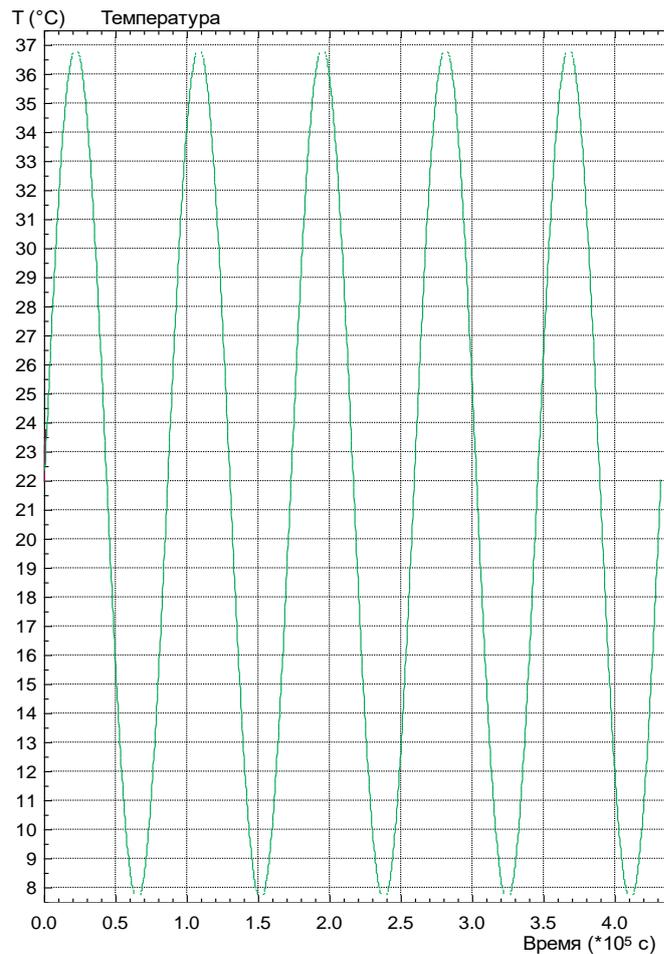


График колебания температур на наружной и внутренней поверхности сэндвич-панели

При этом необходимо отметить, что для получения точных данных согласно рекомендациям [13], произведем моделирование пяти суточных циклов, при этом первые два цикла не будут браться в дальнейших расчетах. На рисунке показаны колебания температуры на поверхностях на протяжении 5 сут. Для трёх последних суточных циклов для наружной поверхности амплитуда колебания равна 28 °C, а для внутренней поверхности сэндвич-панели 1,5 °C соответственно.

Заключение

Как видно из результатов расчетов двумя методиками, разница при определении теплоусвоения внутренней поверхности материала третьего слоя сэндвич-панели отличается в 36 раз, при этом коэффициент затухания колебания амплитуды температуры в ограждающей конструкции отличается в 1,64 раза. Как следствие, мы имеем амплитуду колебания температуры на внутренней поверхности согласно нормативной методике [15], равную 1,83 °C, и согласно

классической теории с учетом теплообмена у внутренней поверхности $1,12\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно.

Если взять предположение, что классическая методика [1, 2] показывает более точный результат, соответственно, нормативная методика тогда показывает завышенные показатели амплитуды колебания температуры на внутренней поверхности. Но это повлечёт за собой перерасход материала и, как следствие, удорожание объекта.

К сожалению, результаты численного моделирования сэндвич-панели в условиях нестационарной теплопередачи не вносят ясность в достоверность той или иной методики, т. к. согласно вычислениям амплитуда колебания температуры на внутренней поверхности равна $1,50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Данное значение меньше результата, полученного по нормативной методике [15], на 18 % и выше, чем значение, рассчитанное по методике [1, 2], на 34 %.

Данное исследование показывает, что теория теплоустойчивости в классическом виде, а также производные из неё инженерные методики требуют доработки с учетом новых аспектов: буферизации тепла в толще ограждающей конструкции [12], несходимости теоретических расчётов и натуральных исследований светопрозрачных ограждающих конструкций и различия между теоретическими расчетами и результатами численного моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фокин К.Ф.* Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина. 5-е изд., пересмотр. Москва : АВОК-ИРЕСС, 2006. 256 с.
2. *Богословский В.Н.* Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). Москва : Высшая школа, 1982. 415 с.
3. *Шкловер А.М.* Теплоустойчивость зданий. Москва : Гос. изд. лит. по стр. и арх., 1952. 90 с.
4. *Шкловер А.М.* Теплопередача при периодических тепловых воздействиях. Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1961. 160 с.
5. *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.
6. *Малявина Е.Г., Усманов Ш.З.* Ограничение амплитуды колебаний температуры помещения в тёплый период года // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 188–194.
7. *Горшков А.С., Рымкевич П.П.* Диаграммный метод описания процесса нестационарной теплопередачи // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 8 (60). С. 68–82.
8. *Панферов В.И., Панферов С.Ф.* Применение метода частотных передаточных функций для решения одной задачи теплоустойчивости ограждения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Строительство и архитектура. 2015. Т. 15. № 1. С. 48–51.
9. *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.
10. *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.
11. *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. January. V. 190:116303.
12. *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.

13. 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
14. Белоус А.Н. Оценка тепловой надежности витражной системы «Spider» // Современное промышленное и гражданское строительство. 2009. Т. 5. № 3. С. 99–105.
15. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Москва : Министерство регионального развития РФ, 2012. 82 с.

REFERENCES

1. Fokin K.F. Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastei zdaniy [Heat engineering of building enclosures]. Yu.A. Tabunshchikov and V.G. Gagarin Eds., 5th ed., Moscow: AVOK-PRESS, 2006. 256 p. (rus)
2. Bogoslovskii V.N. Stroitel'naya teplofizika (teplofizicheskie osnovy otopleniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukh) [Building thermophysics (thermal physics of heating, ventilation and air conditioning)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1982. 415 p. (rus)
3. Shklover A.M. Teploustoichivost' zdaniy [Thermal stability of buildings]. Moscow: Gosstroizdat, 1952. 90 p. (rus)
4. Shklover A.M. Teploperedacha pri periodicheskikh teplovykh vozdeistviyakh [Heat transfer under periodic thermal influences]. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat, 1961. 160 p. (rus)
5. 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)
6. Malyavina E.G., Usmanov Sh.Z. Ogranichenie amplitudy kolebaniy temperatury po-meshcheniya 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)
7. 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)
8. 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)
9. Kutuev M.D., Manapbaev I.K. Ispol'zovanie metoda interpolirovaniya dlya rascheta teploustoichivosti ograzhdayushchikh konstruksii 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)
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Belous A.N., Belous O.E., Krakhin S.V. pereraspredelenie teplovogo potoka v tolshche ograzhdayushchei konstruksii 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
14. Belous A.N. Otsenka teplovoi nadezhnosti vitrazhnoi sistemy "Spider" [Assessment of thermal reliability of "Spider" stained glass system]. Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2009. V. 5. No. 3. Pp. 99–105. (rus)

15. SP 50.13330.2012. Teplovaya zashchita zdanii [Thermal protection of buildings]. Moscow, 2012. 82 p. (rus)

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, us28@ya.ru

Кулумбегова Лонда Зауровна, ст. преподаватель, Юго-Осетинский государственный университет им. А.А. Тибилова, 100001, Республика Южная Осетия, г. Цхинвал, ул. Путина (бывшая ул. Московская), 8, londalonda1965@mail.ru

Белоус Ольга Евгениевна, ассистент, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 286123, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, 2, ol-0929@mail.ru

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, us28@ya.ru

Londa Z. Kulumbegova, Senior Lecturer, South Ossetian State University, 8, Putin Str., 100001, Tskhinvali, Republic of South Ossetia, londalonda1965@mail.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, ol-0929@mail.ru

УДК 697.326

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-120-126

*П.А. АРТАМОНОВ, А.А. ПАРШИНА,
Тюменский индустриальный университет*

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЛОВОГО КОНТУРА КОТЕЛЬНОЙ

Рассмотрены две принципиальные схемы организации циркуляции теплоносителя в котловом контуре с разными техническими решениями по расположению котлового насоса.

При оценке эффективности рассматриваемых схем проведен анализ по следующим основополагающим параметрам: металлоемкость системы, потребляемая электрическая мощность оборудования котельной, электропотребление примененного оборудования, первоначальные капитальные затраты, планируемые эксплуатационные затраты на обслуживание котельной в процессе работы.

Для решения поставленной задачи было подобрано основное оборудование котельной, разработаны трехмерные модели для двух предложенных вариантов схем с учетом соблюдения транспортных габаритов блок-боксов котельной.

Произведена оценка технико-экономических показателей при различных требуемых мощностях. Получен вывод о возможности применения каждой из рассмотренных схем в зависимости от установленной мощности блочно-модульной котельной.

Ключевые слова: котельная; котловой контур; циркуляционный насос; энергоэффективность.

Для цитирования: Артамонов П.А., Паршина А.А. Повышение энергоэффективности котлового контура котельной // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 120–126. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-120-126

*P.A. ARTAMONOV, A.A. PARSHINA,
Industrial University of Tyumen*

ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT OF HYDRAULIC CIRCUIT OF BOILER PLANT

The paper considers two scenarios of the coolant circulation in the hydraulic circuit with different location of the circulating pump. The following parameters are analyzed to estimate the effectiveness of the proposed scenarios: steel intensity of the system, electrical power consumption of the boiler plant, power consumption of the equipment, initial capital costs, costs of the boiler maintenance during its operation. The main equipment of the boiler plant is selected, three-dimensional models are developed for the two scenarios taking into account the shipping dimensions of block-boxes of the boiler plant. The technical and economic indicators at different required capacities are assessed. It is shown that each of the proposed scenarios can be used depending on the specified capacity of block-boxes of the boiler plant.

Keywords: boiler plant; hydraulic circuit; circulating pump; energy efficiency.

For citation: Artamonov P.A., Parshina A.A. Povyshenie energoeffektivnosti kotlovogo kontura kotel'noi [Energy efficiency improvement of hydraulic circuit of boiler plant]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 4. Pp. 120–126. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-120-126

Энергосбережение является актуальной проблемой развития энергетики России. В течение последних десятилетий выработка энергоресурсов и энергетика в целом, с применением комплекса программ по энергосбережению, внесла большой вклад в развитие экономики России (60–65 % экономического роста). Внедрение новых технологий и комплекса мер в энергосбережение сократило показатель, характеризующий расход энергии на единицу продукции, на 19 % в мире, а в индустриальных странах – на 22–26 % [1].

Энергетическая эффективность является важным показателем качества работы котельной установки, отражающим ее экономическую привлекательность в процессе эксплуатации объекта. Одним из важных этапов проектирования является выбор принципиальной схемы работы котельной. В настоящей статье будут рассмотрены технические решения по установке котлового насоса в принципиальных схемах в котельных малой мощности, работающих по независимой схеме теплоснабжения.

Рассмотрим два варианта установки насосного оборудования котлового контура на примере газовой водогрейной котельной с установленной мощностью 10 МВт. В ходе технико-экономического обоснования было определено, что для покрытия требуемой тепловой нагрузки с учетом установки резервного оборудования наиболее оптимальным вариантом является установка четырех водогрейных котлов мощностью 3500 кВт. В рассматриваемых расчетных моделях были приняты котлы производства ЗАО «ОмЗИТ» ТМ «Лаварт». Принципиальные схемы работы приведены на рис. 1.

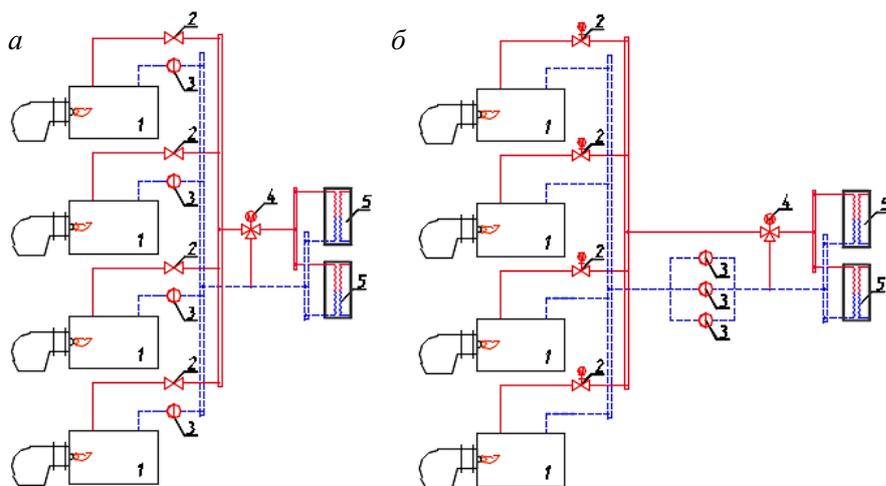


Рис. 1. Принципиальные схемы организации котлового контура:

a – первый вариант: 1 – водогрейный жаротрубный котел, установленной мощностью 3500 кВт; 2 – кран шаровой; 3 – циркуляционный насос; 4 – трехходовой клапан; 5 – теплообменный аппарат; *б* – второй вариант: 1 – водогрейный жаротрубный котел, установленной мощностью 3500 кВт; 2 – задвижка с электроприводом; 3 – циркуляционный насос; 4 – трехходовой клапан; 5 – теплообменный аппарат

Первый вариант представляет собой контур с установкой котлового насоса непосредственно у котла. При данном расположении каждый насос

связан с котлом и включается только при выходе котла в работу. Данная схема наиболее распространена из-за простоты управления работой котловых насосов (рис. 1, а).

Второй вариант котлового контура представляет собой контур с группой насосного оборудования, установленного на обратном трубопроводе. При данной схеме на подающем трубопроводе котла устанавливается запорная арматура с электроприводом для предотвращения циркуляции через неработающий котел. Такой вариант организации контура наиболее надежен с точки зрения эксплуатации объекта ввиду отсутствия жесткой связи между котлом и насосом (рис. 1, б).

В обоих вариантах схем температура в подающем трубопроводе составляет 105 °С, в обратном – 80 °С. Управление работой котлов производится посредством трехходового клапана и датчика температуры, установленного за пределами котельной. Отпуск тепла осуществляется по установленному потребителем температурному графику, котлы работают в каскадном режиме.

Для дальнейшего анализа выбранных вариантов были рассчитаны значения расхода теплоносителя, диаметры трубопроводов, выполнен гидравлический расчет, подобрано насосное оборудование. Полученные данные сведены в табл. 1. Данные о потерях давления в контуре были рассчитаны согласно [2, 3]. Значение расхода определяется по уравнению

$$G_{\text{уч}} = \frac{0,86 \cdot Q(n-1)}{\Delta t}, \quad (1)$$

где Q – установленная мощность котельной, кВт; n – количество котлов; Δt – разность температур между подающим и обратным трубопроводом, °С.

Таблица 1

Варианты	Требуемый расход для одного насоса, м ³ /ч	Марка насоса
Вариант 1	120,4	BL 80/275-7,5/4
Вариант 2	361,2	BL 150/230-18,5/4

По предложенным принципиальным схемам и полученным расчетным данным были разработаны трехмерные модели котлового контура с учетом транспортных габаритов блок-боксов. Трехмерные модели двух вариантов представлены на рис. 2.

На основании полученных данных произведем сравнительный анализ вариантов организации котлового контура по таким параметрам, как металлоемкость, электрическая мощность, годовое электропотребление, капитальные затраты. Результаты сравнения сведены в табл. 2.

Из полученных результатов видно, что меньшие капитальные затраты первого варианта компенсируются с точки зрения преимуществ меньшим электропотреблением второго варианта. Для данной требуемой мощности необходимо рассматривать также и другие факторы выбора принципиальной схемы, такие как уровень автоматизации проектируемой котельной, возможность применения частотного регулирования с целью снижения электропотребления.

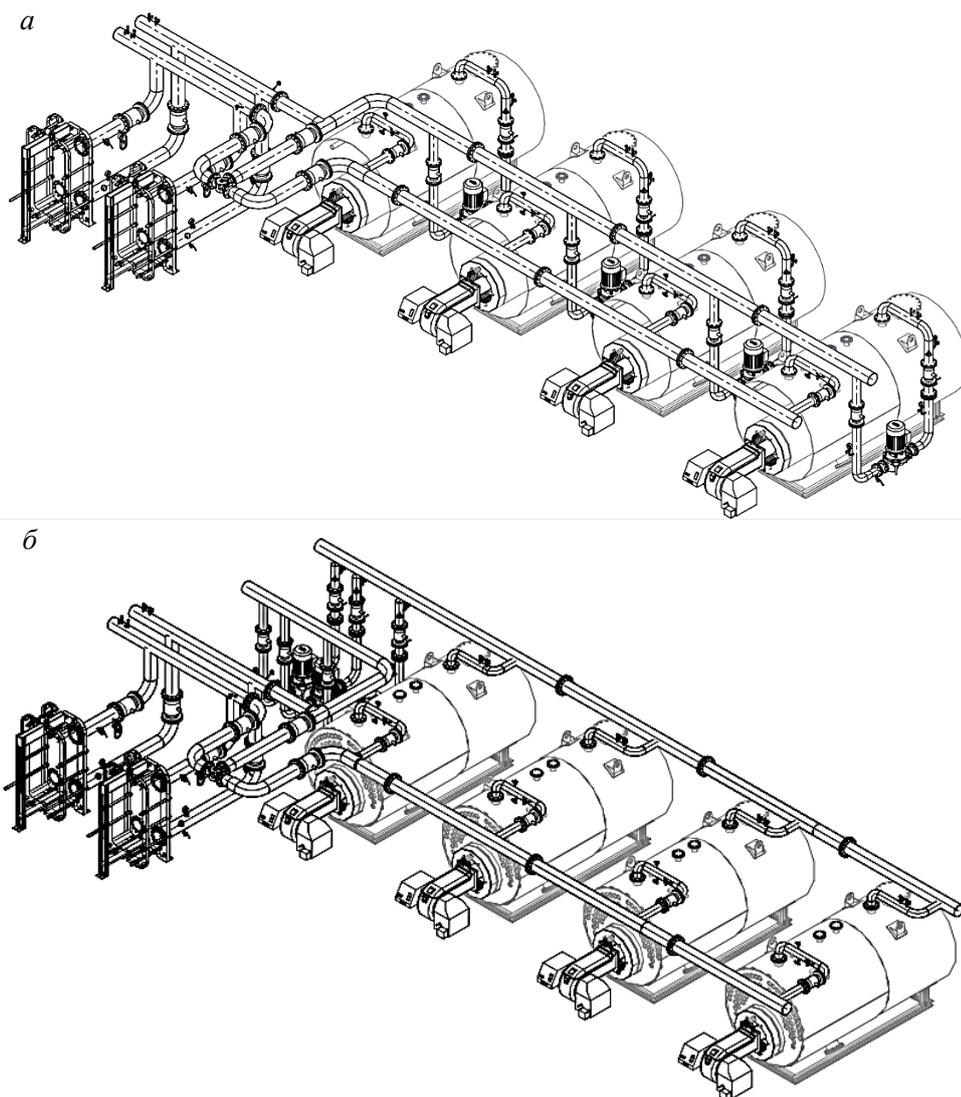


Рис. 2. Трехмерные модели котлового контура

Таблица 2

Варианты	Потребляемая электрическая мощность оборудования, кВт·ч	Электропотребление в год, кВт·ч/г.	Металлоемкость обвязки котлового контура, кг	Капитальные затраты*, тыс. руб
Вариант 1	48,15	181 591	1650	15 649, 6
Вариант 2	44,79	168 919	2750	15 656, 6

* Приведенные капитальные затраты складываются из стоимости основного оборудования котельной: котлы, газовые горелки, насосы котлового контура.

Для получения более релевантной картины рассмотрим иные варианты мощностей котельных: с требуемой тепловой нагрузкой потребителей 5, 15 и 20 МВт. Результаты подбора оборудования и анализа вариантов представлены на рис. 3 и в табл. 3 и 4 соответственно.

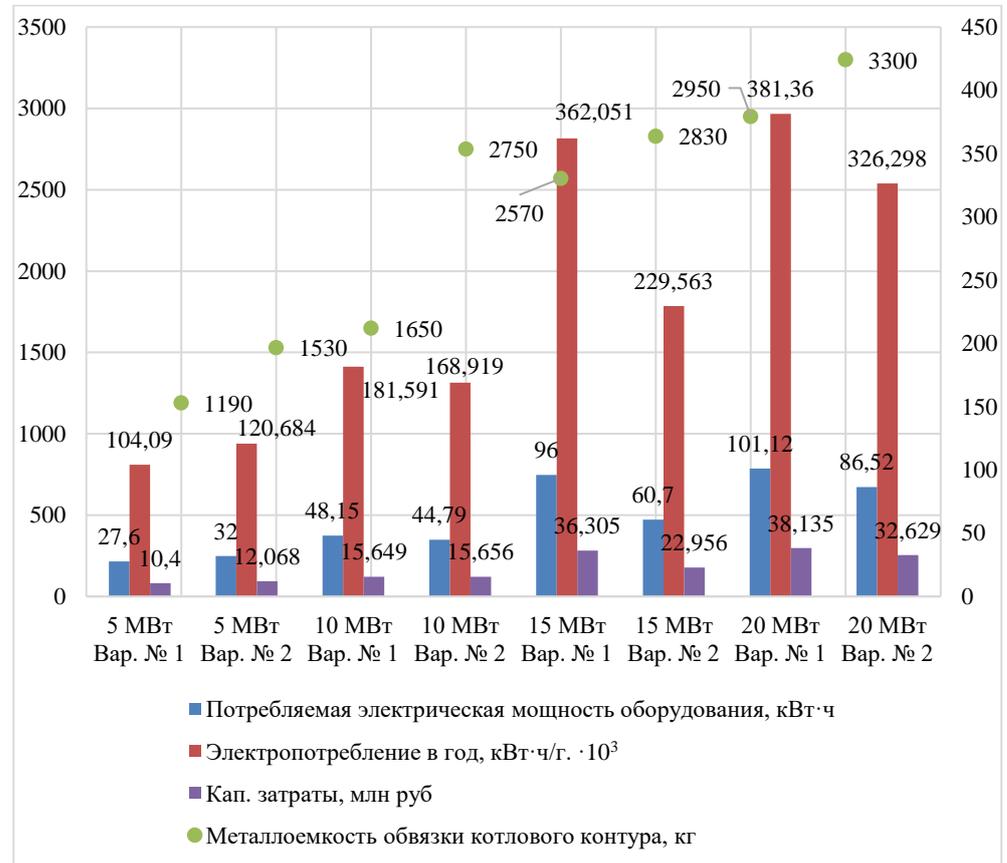


Рис. 3. Сравнительная диаграмма рассматриваемых вариантов

Таблица 3

Варианты	Котел	Горелка	Насос
Суммарная тепловая нагрузка потребителей 5 МВт			
Вариант 1	Lavart 2500M –	Cib Unigas R93A –	Wilo BL 80/275-7,5/4 – 3 шт.
Вариант 2	3 шт.	3 шт.	Wilo BL 80/145-11/2 – 2 шт.
Суммарная тепловая нагрузка потребителей 15 МВт			
Вариант 1	Lavart 5000M –	Cib Unigas R520A –	Wilo BL 80/145-11/2 – 4 шт.
Вариант 2	4 шт.	4 шт.	Wilo BL 150/230-18,5/4 – 2 шт.
Суммарная тепловая нагрузка потребителей 20 МВт			
Вариант 1	Lavart 5000M –	Cib Unigas R520A –	Wilo IL 100/145-11/2 – 5 шт.
Вариант 2	5 шт.	5 шт.	Wilo IL 125/145-15/2 – 3 шт.

Таблица 4

Варианты	Потребляемая электрическая мощность оборудования, кВт·ч	Электропотребление в год, кВт·ч/г.	Металлоемкость обвязки котлового контура, кг	Кап. затраты, тыс. руб.
Суммарная тепловая нагрузка потребителей 5 МВт				
Вариант 1	27,6	104 090	1190	10 408,9
Вариант 2	32	120 684	1530	12 068,2
Суммарная тепловая нагрузка потребителей 15 МВт				
Вариант 1	96	362 051	2570	36 305,5
Вариант 2	60,7	229 563	2830	22 956,7
Суммарная тепловая нагрузка потребителей 20 МВт				
Вариант 1	101,12	381 360	2950	38 135,9
Вариант 2	86,52	326 298	3300	32 629,8

Выводы

Из полученных данных можем сделать следующий вывод: установка насосов котлового контура непосредственно у котла наиболее рациональна при сравнительно малых тепловых нагрузках потребителей – до 10 МВт. Такой вариант обвязки удобен не только с экономической точки зрения, но и с точки зрения расположения оборудования в стесненных условиях. К тому же организация схемы с установкой насосного оборудования у котла упрощает и удешевляет схему с точки зрения автоматизации.

Для котельных с требуемой мощностью свыше 10 МВт рационально рассмотреть второй вариант организации котлового контура с расположением группы насосов на коллекторе обратного трубопровода котлового контура.

Увеличение единичной мощности котла непосредственно влияет на характеристики подбираемого насоса: его расход, электрическую мощность, что, в свою очередь, увеличивает затраты на обслуживание проектируемой котельной и влияет на диаметры применяемых в контуре трубопроводов.

К тому же, ввиду габаритов котлов большой мощности (5 МВт и более), обустройство первой схемы в условиях сохранения требуемых габаритов блок-бокса и минимальной ширины прохода в соответствии с СП 89.13330.2016 «Котельные установки. Актуализированная редакция СНиП II-35-76» является сложноосуществимым.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров А.А., Митрова Т.А., Кулагин В.А. Долгосрочный прогноз развития энергетики мира и России // Экономический журнал ВШЭ. 2012. № 2. С. 172–204.
2. Альтигуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика (основы механики жидкости). Москва : Изд-во литературы по строительству, 1965. 273 с.
3. Богословский В.Н., Крупнов Б.А., Сканиви А.Н. и др. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 частях. Ч. 1. Отопление / под ред. И.Г. Старовойтова, Ю.И. Шиллера. 4-е изд., перераб. и доп. Москва : Стройиздат, 1990. 344 с.

REFERENCES

1. *Makarov A.A., Mitrova T.A., Kulagin V.A.* Dolgosrochnyi prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii [Long-term forecast of the energy sector development in Russia and worldwide]. *Ekonomicheskii zhurnal VShE*. 2012. No. 2. Pp. 172–204. (rus)
2. *Al'tshul' A.D., Kiselev P.G.* Gidravlika i aerodinamika (osnovy mekhaniki zhidkosti) [Hydraulics and aerodynamics (basics of fluid mechanics)]. Moscow: Stroiizdat, 1965. 273 p. (rus)
3. *Bogoslovskii V.N., Krupnov B.A., Skanavi A.N. et al.* Vnutrennie sanitarno-tehnicheskie ustroistva [Internal sanitary installations]. In 3 Pts. Pt. 1. Otoplenie [Heating system]. I.G. Staroverov and Yu.I. Shiller, Eds., Moscow: Stroiizdat, 1990. 344 p. (rus)

Сведения об авторах

Артамонов Павел Александрович, канд. техн. наук, доцент, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, artamonovpa@tyuiu.ru.

Паришина Алина Андреевна, магистрант, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, parshinaa.a@yandex.ru

Authors Details

Pavel A. Artamonov, PhD, A/Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, artamonovpa@tyuiu.ru

Alina A. Parshina, Graduate Student, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, parshinaa.a@yandex.ru

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.13

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-127-137

*А.А. ФИЛИМОНОВ, Д.В. ЛИПИХИН,
А.Е. МЕЛЬНИКОВ, К.В. КИРЬЯНОВА,
АО «ТомскНИПИнефть»*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОМЫСЛОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В настоящей статье приводится опыт специалистов АО «ТомскНИПИнефть» по проектированию подземных трубопроводов в многолетнемерзлых грунтах.

Представлена последовательность выполнения комплексных теплотехнических и прочностных расчетов, освещена важность учета различных факторов при проведении расчетов, а также ограничения применения различных вариантов моделирования грунтов.

Отмечены важные пункты при проведении прочностных расчетов и используемого программного обеспечения.

Приведены компенсирующие мероприятия, применяемые при проектировании в криолитозоне, показан эффект от применения части мероприятий.

Описано разработанное техническое решение по применению намораживаемых грунтовых опор, показана суть технического решения. Описана общая блок-схема проведения комплексных теплотехнических и прочностных расчетов, сделаны выводы о применении.

Ключевые слова: подземная прокладка трубопровода; трубопровод в ММГ; комплексные расчеты; итеративный подход к расчетам подземных трубопроводов, расчет с использованием протяженных участков; профили осадок по трассе трубопровода; теплотехнические и прочностные расчеты; моделирование участков трубопровода; компенсирующие мероприятия для подземных трубопроводов; намораживаемая грунтовая опора; термостабилизация грунтов.

Для цитирования: Филимонов А.А., Липихин Д.В., Мельников А.Е., Кирьянова К.В. Проектирование промышленных подземных трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах с использованием современных комплексов проектирования // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 127–137.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-127-137

A.A. FILIMONOV, D.V. LIPIKHIN, A.E. MEL'NIKOV, K.V. KIR'YANOVA,
АО "TomskNIPIneft"

MODERN DESIGN SYSTEM FOR FIELD UNDERGROUND PIPELINE CONSTRUCTION IN PERMAFROST SOILS

This paper describes the experience of specialists from TomskNIPIneft in the underground pipeline laying in permafrost regions. The integrated and strength analyses are given herein, and the importance of considering the different factors for these analyses is shown as well as the limitations of conducting various scenarios of soil modeling. The important points are identified for carrying out the software-based strength analysis. Compensating measures are taken in the underground pipeline laying in the permafrost region. The technical solution is proposed for the use of frozen soil supports; its essence is described. The general block diagram of the heat engineering and strength analyses is presented in this paper.

Keywords: underground pipeline laying; permafrost; integrated calculations; iterative approach; pipeline analysis; pipeline setting profiles; heat and strength analysis; modeling of pipeline sections; compensating measures for underground pipelines; frozen ground support; thermal soil stabilization.

For citation: Filimonov A.A., Lipikhin D.V., Mel'nikov A.E., Kir'yanova K.V. Proektirovanie promyslovykh podzemnykh truboprovodov na mnogoletnemerzlykh gruntakh s ispol'zovaniem sovremennykh kompleksov proektirovaniya [Modern design system for field underground pipeline construction in permafrost soils]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 4. Pp. 127–137.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-127-137

Введение

В настоящий момент развитие нефтегазовой отрасли напрямую связано с освоением территорий, расположенных в криолитозоне. Нередко при проектировании объектов, расположенных в местах распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ), проектные организации сталкиваются с проблематикой отсутствия методологии выполнения расчетов в нормативно-технической литературе. В результате возможно появление риска, заключающегося в разработке и принятии ошибочных проектных решений, что может привести к серьезным аварийным ситуациям при эксплуатации трубопроводов.

Действующие нормативные документы регламентируют несколько основных способов прокладки трубопроводов на ММГ: наземный, подземный и наземный. По мнению профильных специалистов проектных институтов ПАО «НК «Роснефть», основным способом прокладки трубопроводов по участкам распространения ММГ должен быть наземный, как способ, обеспечивающий надежную эксплуатацию, возможность оперативного проведения ремонтных работ при возникновении аварийных ситуаций, а также оказывающий только локальное тепловое воздействие на ММГ в местах подземных переходов под естественными и искусственными преградами. Однако при определенных геологических и геокриологических условиях или на участках, где наземным способом проложить трубопровод нельзя, может применяться его подземная прокладка.

Применение подземного способа прокладки, согласно технико-экономическим сравнениям, способствует сокращению капитальных затрат на строи-

тельство трубопроводов в несколько раз за счет уменьшения металлоемкости и увеличения скорости строительного-монтажных работ.

При этом при подземной прокладке важен более ответственный контроль и подход к выполнению работ не только на стадиях строительства и эксплуатации, но и на этапе проектирования: более тщательное и качественное проведение инженерных изысканий, выполнение детализированных расчетов и корректный подбор защитных мероприятий.

Для нужд проектирования сотрудниками АО «ТомскНИПИнефть» был применен итеративный подход к расчетам подземных трубопроводов, эксплуатируемых в районах распространения ММГ. Выполнялись два комплексных расчета: теплотехнический – для учета влияния на основание и прочностной – с проверкой условий прочности трубопровода.

Описание объекта проектирования

В качестве объекта проектирования выступило месторождение в Ямало-Ненецком автономном округе Тюменской области. Климат района резко континентальный. Зима суровая, холодная, продолжительная, лето короткое и теплое, резкие колебания температуры в течение года и даже суток. Участок проведения работ характеризуется массивно-островным распространением многолетнемерзлых грунтов. В районе проектирования отмечаются следующие типы ландшафта: суходольные участки, тальные озера и торфяники с участками распространения мерзлых грунтов. Инженерно-геологический разрез района прохождения трасс проектируемых коммуникаций сложен как мерзлыми, так и тальными грунтами.

Проектируемый объект – промышленный нефтепровод с температурой продукта до 37 °С, проложенный подземным способом. Объект находится в сложных геологических условиях, прокладывается через многолетнемерзлые грунты, где наблюдается частое изменение положения кровли мерзлоты.

Последовательность выполнения комплексных расчетов

Подходы к расчётам подземных трубопроводов в проектных институтах различны, применяется как отдельное проведение теплотехнических расчетов для подбора защитных мероприятий без учета прочностных расчетов, так и расчет усредненных расчетных моделей, не учитывающих всех условий залегания трубопровода.

Для обоснования безопасности технического решения подземной прокладки специалистами отдела геотехнического мониторинга и прогнозного моделирования и отдела трубопроводного транспорта АО «ТомскНИПИнефть» был реализован новый подход к проектированию линейных объектов в сложных инженерно-геологических условиях – комплексное проведение теплотехнических и прочностных расчетов для подбора наиболее эффективного и безопасного технического решения.

Теплотехнический расчет подземных трубопроводов требуется выполнять в случаях, когда трубопровод прокладывается в грунтовых условиях с присутствием ММГ как сливающегося, так и несливающегося типа – с заглубленной кровлей. Суть расчета состоит в определении теплового воздей-

ствия от трубопровода на мерзлоту, т. е. в определении ореолов оттаивания грунта и значений его осадки в пределах данных ореолов.

Теплотехнические расчеты достаточно трудоемки и затратны по времени, в связи с чем авторами было рассмотрено два варианта подхода к выполнению данных расчетов применительно к линейным трубопроводам: с использованием протяженных участков и с учетом типизации инженерно-геологических условий (ИГУ).

Расчет с использованием протяженных участков предполагает проведение теплотехнических расчетов всей трассы с учетом фактического пространственного положения трубопровода (изгибы, подъемы, опуски, компенсаторы и т. д.), изменения геологических условий (учет всех инженерно-геологических скважин в пределах расчетной модели и напластования грунтов между ними), динамики изменения температур грунтов в трехмерном пространстве основания (восстановление температурного режима ММГ по всем инженерно-геологическим скважинам, входящим в расчетную модель), динамики изменения температур продукта в трубопроводе за период расчета и, по мнению авторов, является приоритетным способом осуществления теплотехнических расчетов линейных объектов.

На основании опыта проведения теплотехнических расчетов авторами выявлено несколько основных факторов, требуемых для учета при создании моделей для расчетов с использованием протяженных участков.

1. При выполнении расчетов с использованием протяженных участков требуется производить разбиение инженерно-геологических профилей под размеры расчетных моделей, позволяющих с максимальной эффективностью просчитать всю трассу. Длина одного выделенного участка может варьироваться в среднем от 600 до 1000 м.

2. Граница выделенного участка обязана быть проведена на однородных условиях, без резкого изменения геологических наслоений, положения кровли мерзлоты и температуры грунтов для уменьшения погрешности при анализе результатов расчетов отдельных моделей.

3. Количество граничных условий III рода для одной расчетной модели зависит от условий расположения поверхностного геологического слоя [2]. При наличии различных поверхностных условий требуется применять различные граничные условия III рода со своими расчетными характеристиками.

Расчет с учетом типизации ИГУ является упрощенным вариантом для стадии проектной документации, а также для трасс с относительно простыми и однотипными инженерно-геологическими и инженерно-геокриологическими условиями. Данный метод позволяет сократить объем трудозатрат на расчет участков с максимально схожими инженерно-геологическими и инженерно-геокриологическими условиями по трассе трубопровода. При этом следует отметить, что подход с использованием типизации ИГУ применим только в случае выполнения предварительных оценок, а также на стадии предпроектной проработки технических решений.

При расчете по типизированным ИГУ в программном комплексе авторами создавалась упрощенная расчетная трехмерная модель грунтового основания с помещенным в нее трубопроводом. Данная модель также должна учи-

тивать все утвержденные исходные данные, но результаты выделенного типа инженерно-геологических условий проецируются на участки с аналогичными условиями. Расчетная модель значительно сокращается по длине моделируемого участка (до длины 60–100 м), а решаемая тепловая задача, по сути, сводится к двумерной. При данном подходе очень важным является корректное выполнение типизации инженерно-геологических и геокриологических условий по трассе. Для выполнения качественного анализа количество выделенных типов ИГУ должно быть необходимым и достаточным.

Следует обратить особое внимание на то, что данный подход неприменим в случаях с резким изменением инженерно-геологических или инженерно-геокриологических условий, а также при резком изменении геометрического положения трубопровода, поскольку не учитывает границ переходов состояний «ММГ – талый грунт» и наоборот. Таким образом, данный подход имеет относительно небольшую область применения – на однородных, непротяженных участках без изменений глубины прокладки трубопровода, без значительных и резких изменений основных мощностей геологических наслоений, а также в отсутствие резкого изменения поверхностных условий и температуры грунтов.

Результатами теплотехнических расчетов являются температурные поля, изменяющиеся во времени от теплового воздействия трубопровода на грунт за расчетный срок эксплуатации, по которым определяются значения ореолов оттаивания грунта в его основании. По данным о распространении ореолов оттаивания определяются расчетные значения осадок грунтов при их оттаивании [1].

Для расчетов с использованием протяженных участков авторы разрабатывают профили осадок по трассе трубопровода, представляющие собой линейные графики, совмещенные с профилем трубопровода. Данные результаты далее обрабатываются в отделе трубопроводного транспорта для проведения комплекса прочностных расчетов.

Прочностные расчеты трубопровода специалисты АО «ТомскНИПИ-нефть» выполняют в специализированном программном обеспечении после получения профилей осадок. Для корректного задания модели программа должна обладать определенным функционалом: задание произвольного значения осадок на любом выбранном участке, возможность учета свойств слоев грунта основания и засыпки, разности отметок рельефа и расстановки балластирующих устройств.

Авторы применяют программу, использующую балочную расчетную модель трубопровода, при этом взаимодействие трубопровода с окружающим грунтом моделируется продольными и поперечными упругими опорами (билинейными пружинами), расставленными с определенным шагом. Функция учета осадки позволяет задавать предварительное перемещение трубопровода в вертикальной плоскости в каждой из таких опор.

Авторы отмечают, что для учета воздействия нагрузок от прилегающих участков при температурных расширениях расчеты должны выполняться на всю протяженность проектируемого трубопровода.

При выполнении расчета трубопровода большой протяженности может потребоваться разделение общей расчетной модели на несколько отдельных участков, это обусловлено ограничением количества степеней свободы в расчетном комплексе. Для расчета подземного трубопровода, прокладываемого на ММГ с множеством промежуточных точек для устройства термостабилизации или утяжелителей, авторы рекомендуют выполнять разбивку модели на участки не более 10 км.

Для проведения прочностных расчетов в условиях распространения ММГ было протестировано несколько программных комплексов. В результате авторы пришли к выводу, что не все программные комплексы адаптированы для пользователя и требуют навыков программирования для внесения исходных данных в расчетную модель, что увеличивает порог вхождения для использования программного обеспечения.

Фактически теплотехнические и прочностные расчеты сводятся к проверке условий прочности и устойчивости трубопровода при проведении определенных защитных мероприятий. Поэтому основной задачей проектировщиков подземных трубопроводов на ММГ является назначение эффективных и экономически обоснованных проектных защитных мероприятий для обеспечения безаварийной эксплуатации на весь срок службы трубопровода.

Компенсирующие мероприятия для подземных трубопроводов

Компенсирующие или защитные мероприятия можно разделить на две категории – мероприятия для основания и мероприятия для трубопровода.

Среди защитных мероприятий, относящихся к трубопроводу, авторы выделяют и используют следующие:

- замена упругих изгибов на гнутые отводы;
- увеличение толщины стенки проектного отвода;
- замена проектных отводов на отводы большего радиуса гнутья (5DN, 10DN, отводы холодного гнутья);
- установка подземных П-образных компенсаторов;
- устройство компенсационных матов или амортизирующих подушек.

В результате неравномерной осадки грунта в теле трубопровода возникает повышенная концентрация напряжений в тех местах, где происходит смена мерзлых и талых грунтов. Таким образом, в зависимости от реальной геологической ситуации может потребоваться применение дополнительных мероприятий для компенсации этих напряжений [3]. Исходя из опыта расчетов выявлено, что наиболее уязвимыми участками являются отводы и упругие изгибы, т. е. участки с повышенной концентрацией напряжений, вызванных температурными расширениями трубопровода.

На рис. 1 и 2 показан эффект от применения компенсирующих мероприятий. Темно-серым цветом выделена область с повышенной концентрацией напряжений, где условия прочности не выполняются.

Среди защитных мероприятий, относящихся к основанию, авторы выделяют и используют следующие:

- тепловая изоляция трубопровода;
- замена грунта в его основании на расчетную глубину;
- применение активной температурной стабилизации грунтов.



Рис. 1. Замена проектного отвода 5DN (слева) на отвод холодного гнутья (справа)



Рис. 2. Замена упругого изгиба (слева) на П-образный компенсатор (справа)

Основная задача любого из представленных защитных мероприятий основания – уменьшение осадки основания под трубопроводом до допустимых значений с целью снижения напряжений и деформаций трубопровода. Тепловая изоляция уменьшает передачу тепловой энергии от трубопровода, замена грунта производится при наличии под трубопроводом сильнопросадочных при оттаивании слоев, применение термостабилизации способствует компенсации теплового влияния трубопровода в зимний период путем понижения температуры грунта в его основании. Следует отметить, что существуют и другие традиционные компенсирующие мероприятия, например укладка тепловой изоляции на дно и стенки котлована, но они однозначно уступают в эффективности применения. Опыт эксплуатационных служб показывает, что данное мероприятие не защищает от проникновения теплового воздействия трубопровода, поскольку тепловая изоляция по дну и стенкам котлована подвижна, при эксплуатации деятельный слой совершает механические движения, возникают мостики тепла в образующихся щелях между плитами тепловой изоляции.

В зависимости от условий на трассе трубопровода, а также интенсивности воздействия на грунт рекомендуется выбирать либо одиночное компенсирующее мероприятие, либо их сочетание, например совместное применение ППУ и замена грунта под трубопроводом.

Термостабилизация не является традиционным защитным мероприятием для подземных линейных трубопроводов. К тому же её реализация требует значительных расходов при использовании мерзлых грунтов по I принципу, т. е. с сохранением их состояния, поэтому применяется она довольно редко. Тем не менее существует возможность снизить общую стоимость применения ТСТ с обеспечением безопасности эксплуатации.

Для выбранного объекта проектирования применить традиционные защитные мероприятия не удалось из-за высоких значений осадки трубопровода и наличия осаживаемых грунтов большой мощности под трубопроводом. В связи с этим специалистами группы геотехнического мониторинга АО «ТомскНИПИ-

нефть» было разработано и осуществлено компенсирующее мероприятие, которое ранее не применялось в качестве технического решения – прокладка подземного трубопровода на намораживаемых грунтовых опорах.

Намораживаемая грунтовая опора представляет собой практически неосаживаемый грунтовый массив, небольших размеров в плане, намороженный при помощи отдельностоящих термостабилизаторов. Установка таких опор для трубопровода производится с определенным расчетным шагом вдоль трассы.

При использовании намораживаемых опор принцип применения ММГ является комбинированным – II принцип применения ММГ с использованием намораживаемых грунтовых опор по I принципу.

Для намораживания каждой грунтовой опоры предусмотрено устройство от 3 до 5 термостабилизаторов, устанавливаемых по обе стороны трубопровода, в соответствии с конкретными грунтовыми условиями и расчетами. Схема устройства намораживаемых опор приведена на рис. 3.

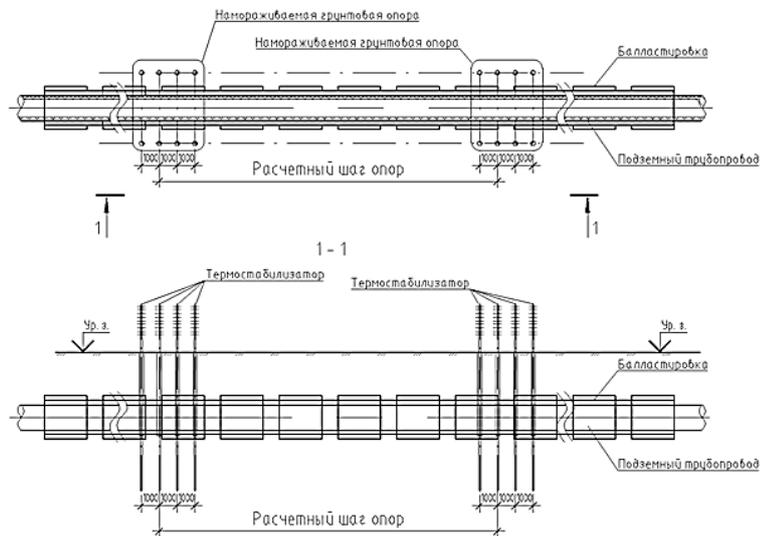


Рис. 3. Схема установки намораживаемых грунтовых опор

Суть данного мероприятия заключается в поддержании в мерзлом состоянии определенных опорных точек трубопровода при помощи термостабилизации грунтов, благодаря этому максимально снижаются осадки грунтового основания в месте их установки, при этом жесткость трубопровода на участках, расположенных между опорами, обеспечивается за счет прочностных характеристик самой трубы. Таким образом, удастся сохранить пространственное положение трубопровода в соответствии с проектом, не прибегая к сплошному расположению термостабилизации и переходу на I принцип использования ММГ, тем самым значительно сокращая капитальные затраты. Применение намораживаемых опор особенно целесообразно при прокладке через осаживаемые грунты, в которых большие значения осадок грунтового основания в пролете нивелируются за счёт сохранения положения трубопровода на местах расположения опор, а также собственной жесткости трубопровода.

Шаг расстановки опор необходимо подбирать в ходе выполнения прочностного расчета, он зависит от класса прочности, диаметра и толщины трубопровода, а также длины самой намораживаемой опоры.

Схема моделирования участка подземной прокладки трубопровода с устройством намораживаемых грунтовых опор в программе для проведения прочностных расчетов показана на рис. 4.

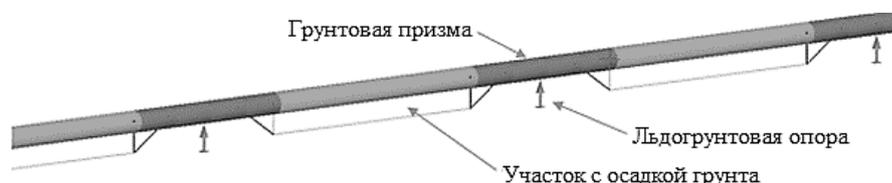


Рис. 4. Схема моделирования участка подземной прокладки трубопровода с устройством намораживаемых грунтовых опор

В качестве намораживаемых опор авторы принимают нестандартные крепления, ограничивающие перемещения в вертикальной плоскости. В точке установки намораживаемой грунтовой опоры моделируется грунтовая призма, в которой задаются нулевые значения осадки. Длина грунтовой призмы зависит от количества последовательно установленных в грунтовой опоре термостабилизаторов.

Все описанные этапы проектирования подземного трубопровода, принятые в АО «ТомскНИПИнефть», можно представить в виде блок-схемы (рис. 5).



Рис. 5. Блок-схема проведения комплексных теплотехнических и прочностных расчетов подземного трубопровода, прокладываемого через ММГ

Особое внимание в схеме следует обратить на блоки подбора защитных мероприятий. Каждое компенсирующее мероприятие для основания или для трубопровода должно выбираться в соответствии с технико-экономическим анализом стоимости в каждом конкретном случае. Дорогостоящие мероприятия допустимо использовать только при невозможности применения иных компенсирующих мероприятий.

Заключение

Из-за отсутствия конкретных методик и нормативной документации специалистами АО «ТомскНИПИнефть» был сформирован новый подход к проектированию подземных трубопроводов на ММГ с определением четкой последовательности процессов проектирования, распределением ответственности за проведение требуемых расчетов с учетом всех нюансов проектирования в сложных условиях.

Сформированный подход к выполнению комплекса теплотехнических и прочностных расчетов при проектировании подземных трубопроводов, прокладываемых в ММГ, а также применение современного высокопроизводительного ПО позволило специалистам АО «ТомскНИПИнефть» принять и обосновать наиболее эффективные и экономически целесообразные проектные решения по прокладке трубопроводов подземным способом на представленном объекте проектирования.

Накопленный опыт выполнения прогнозных расчетов подземных трубопроводов способствовал формированию упрощенных методик, таких как применение расчетов с типизацией ИГУ, способных сократить трудозатраты на выполнение теплотехнических расчетов на этапе предварительной оценки проектных решений, без существенного влияния на полученные результаты.

Опыт проведения прочностных расчетов в разном программном обеспечении с анализом результатов позволил в условиях ограниченного времени проектирования выбрать оптимальную программу и выполнить моделирование трубопровода на всю протяженность с учетом влияния опасных геологических процессов на напряженно-деформированное состояние трубы.

Фактически результатом настоящего комплексного подхода к выполнению теплотехнических и прочностных расчетов является разработка новых технических решений по повышению устойчивости подземных трубопроводов, таких как применение намораживаемых грунтовых опор. Такие технические решения способствуют оптимизации капиталовложений, а также развитию отрасли в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04–88 (с Изменениями № 1–4).
2. РСН 67-87. Республиканские строительные нормы. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами.
3. Лисин Ю.В., Сощенко А.Е., Суриков В.И., Павлов В.В., Зотов М.Ю. Технические решения по способам прокладки нефтепровода Заполярье – НПС «Пурпе» // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2014. № 1. С. 24–28.

REFERENCES

1. SP 25.13330.2012. Osnovaniya i fundamenti na vechnomerzlykh gruntakh. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.02.04-88 (s Izmeneniyami N 1-4) [Foundations and footings on permafrost soils. Amended]. (rus)
2. RSN 67-87. Respublikanskiye stroitel'nye normy. Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva. Sostavlenie prognoza izmenenii temperaturnogo rezhima vechnomerzlykh gruntov chislennymi metodami [Republican construction norms. Engineering surveys for construction. Prediction of temperature changes in permafrost soils by numerical methods]. (rus)
3. *Lisin U.V., Soschenko A.E., V.I. Surikov, Pavlov V.V., Zotov M.Yu.* Tekhnicheskie resheniya po sposobam prokladki nefteprovoda Zapolyar'e – "NPS Purpe" [Technical solutions for Zapolyar'e – "Purpe" pipeline laying]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov.* 2014. No. 1. Pp. 24–28. (rus)

Сведения об авторах

Филимонов Андрей Алексеевич, ведущий инженер, АО «ТомскНИПИнефть», 634027, г. Томск, пр. Мира, 72, FilimonovAA@tomsknipi.ru

Липихин Дмитрий Владимирович, начальник отдела, АО «ТомскНИПИнефть», 634027, г. Томск, пр. Мира, 72, LipihinDV@tomsknipi.ru

Мельников Александр Евгеньевич, ведущий инженер, АО «ТомскНИПИнефть», 634027, г. Томск, пр. Мира, 72, MelnikovAE@tomsknipi.ru

Кирьянова Ксения Владимировна, начальник отдела, АО «ТомскНИПИнефть», 634027, г. Томск, пр. Мира, 72, KiryanovaKV@tomsknipi.ru

Authors Details

Andrei A. Filimonov, Lead Engineer, AO "TomskNIPIneft", 72, Mira Str., 634027, Tomsk, Russia, FilimonovAA@tomsknipi.ru

Dmitrii V. Lipihin, Department Head, AO "TomskNIPIneft", 72, Mira Str., 634027, Tomsk, Russia, LipihinDV@tomsknipi.ru

Aleksandr E. Mel'nikov, Lead Engineer, AO "TomskNIPIneft", 72, Mira Str., 634027, Tomsk, Russia, MelnikovAE@tomsknipi.ru

Kseniya V. Kir'yanova, Department Head, AO "TomskNIPIneft", 72, Mira Str., 634027, Tomsk, Russia, KiryanovaKV@tomsknipi.ru

УДК 001.894.2:624.15

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-138-146

*А.С. КЛИМОВ, Р.Т. ЕМЕЛЬЯНОВ, Е.В. ЧУМАКОВА, О.Л. КЛИМОВА,
Сибирский федеральный университет*

МЕТОД ОХЛАЖДЕНИЯ ОКОЛОСВАЙНЫХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ В ЗОНЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО СЕВЕРНОГО КЛИМАТА

Обоснована актуальность выполняемых работ по улучшению или упрочнению грунта в зоне вечной мерзлоты под фундаментом зданий или линейных инженерных сооружений в условиях Крайнего Севера.

Проанализированы сезонные колебания замораживания зимой и частичного оттаивания летом поверхностного слоя вечной мерзлоты. По данным современных изысканий температуры грунта приведен прогноз растепления многолетнемерзлых грунтов. Рассмотрены перспективные решения по стабилизации грунтового основания многолетнемерзлых грунтов в северных климатических зонах. Приведены ссылки на научно-техническую литературу о новейших проектных решениях и разработках по созданию многих систем и устройств для термостабилизации многолетнемерзлых грунтов.

Разработана принципиальная схема экспериментальной установки для фиксирования изменения температур воздуха окружающей среды и вечномерзлого грунта. Выбрано оборудование для исследования системы автоматического управления процессом охлаждения обсадной трубы фундаментной сваи и околосвайного вечномерзлого грунта. Для изучения эффективности применения системы автоматического управления процессом охлаждения обсадной трубы фундаментной сваи и околосвайного вечномерзлого грунта создана экспериментальная установка.

Построение модели и моделирование системы автоматического управления процессом охлаждения обсадной трубы фундаментной сваи и околосвайного вечномерзлого грунта реализовано в общетехническом шаблоне среды SimInTech. Система автоматического управления обеспечивает программное управление термоэлектрическими модулями в автоматическом режиме с целью наилучшей их ориентации на температуру воздуха окружающей среды в зависимости от температуры массива грунта в околосвайном пространстве фундамента.

Запатентовано устройство для стабилизации мерзлого грунта свайного фундамента с обсадными трубами, содержащее систему автоматического управления процессом охлаждения околосвайного пространства фундамента.

Ключевые слова: фундамент; многолетнемерзлые грунты; здания и сооружения; устройства термостабилизации грунтов.

Для цитирования: Климов А.С., Емельянов Р.Т., Чумакова Е.В., Климова О.Л. Метод охлаждения околосвайных многолетнемерзлых грунтов в зоне экстремального северного климата // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 138–146.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-138-146

*A.S. KLIMOV, R.T. EMEL'YANOV, E.V. CHUMAKOVA, O.L. KLIMOVA,
Siberian Federal University*

COOLING OF NEAR-PILE PERMAFROST SOILS IN THE ARCTIC REGION

This work is performed to improve or strengthen the soil in the permafrost region under building foundations or engineering structures in the conditions of the Far North. Freezing in

winter and partial thawing in summer of the surface layer of permafrost are analyzed. According to the surveys on soil temperature, thawing of permafrost soils is predicted. Promising solutions are considered for the permafrost soil stabilization. The latest design solutions and developments are presented for the creation of many systems and devices for thermal stabilization of permafrost soils. A schematic diagram is suggested for the experimental installation for recording changes in ambient air temperatures and permafrost. The equipment is selected for studying the automated control system for the cooling process of casing pipe of the foundation pile and near-pile permafrost soil. An experimental installation is proposed to study the effectiveness of the automated control system. The model and simulation of this system is implemented in the SimInTech program. The automatic control system provides control for thermoelectric modules in automatic mode in order provide their best orientation in the ambient air temperature, depending on the soil temperature in the near-pile space of the foundation. A device is patented for stabilizing the frozen ground of a pile foundation with casing pipes containing a system for automated control for cooling process of the near-pile foundation.

Keywords: foundation; permafrost soils; buildings; thermal stabilization of soils.

For citation: Klimov A.S., Emelyanov R.T., Chumakova E.V., Klimova O.L. Metod okhlazhdeniya okolosvaynykh mnogoletnemerzlykh gruntov v zone ekstremal'nogo severnogo klimata [Cooling of near-pile permafrost soils in the Arctic region]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 4. Pp. 138–146. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-138-146

Проблемы, связанные с растеплением многолетнемерзлых грунтов в Арктической зоне, значительны и многообразны [1–3]. В суровом северном климате при естественных условиях верхний слой вечномёрзлых земель подвергается регулярным температурным изменениям. Вследствие этого поверхностный слой испытывает летом влагонасыщение, а зимой – пучение грунта, что приводит к деформированию опорных конструкций зданий и сооружений (рис. 1).



Рис. 1. Разрушение административного здания (слева) и жилого здания (справа) в г. Норильске

По данным современных изысканий, температуры грунта на глубине 10–15 м могут составлять $+4...+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ и отличаются от установленных

в 1970–80-х гг. на 6–10 °С. Расчет оценки растепления вечномерзлых грунтов представлен в работе [4]. Согласно предварительным расчетам во второй половине XXI в. мерзлотный слой полностью деградирует [1–3].

Поэтому улучшение или упрочнение грунта в зоне вечной мерзлоты под фундаментом зданий или линейных инженерных сооружений является одной из наиболее актуальных и одновременно труднорешаемых задач в условиях Крайнего Севера. В настоящее время большое внимание уделяется поиску новых перспективных решений по стабилизации грунтового основания [5–7]. Данные задачи привели к проектным решениям и созданию многих систем и устройств [8–11].

В соответствии с обозначенными проблемами целью исследования является разработка и моделирование экспериментальной установки для изучения эффективности применения системы автоматического управления (САУ) процессом охлаждения и замораживания грунта, используемой при эксплуатации фундаментных свай зданий и сооружений с металлическими обсадными трубами, возведенных в районах вечномерзлых грунтов, которая будет предотвращать растепление поверхностного слоя грунта в широтах Арктического региона. Поставленная цель решалась методом комплексного подхода, включающего в себя анализ и обобщение данных научно-технической литературы по проблеме исследования.

Для исследования САУ процессом охлаждения обсадной трубы фундаментной сваи и околосвайного вечномерзлого грунта использовалась печатная плата Arduino Uno. Arduino – аппаратная вычислительная платформа, основными компонентами которой являются плата ввода-вывода и среда разработки на языке Processing/Wiring. На платформе Arduino Uno (рис. 2) имеется 14 цифровых вход/выходов, 6 аналоговых входов, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и кнопка перезагрузки.



Рис. 2. Платформа Arduino Uno

Для работы необходимо подключить платформу к ПК при помощи кабеля USB либо подключить питание посредством адаптера AC/DC или батареи. Описание печатной платы Arduino Uno представлено в табл. 1.

Таблица 1

Описание печатной платы Arduino Uno

Параметры	Значения
Рабочее напряжение	5 В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7–12 В
Входное напряжение (предельное)	6–20 В
Микроконтроллер	ATmega 328
Аналоговые входы	6
Постоянный ток для вывода 3,3 В	50 мА
ОЗУ	2Кб (ATmega328)
EEPROM	1 Кб (ATmega328)
Цифровые входы/выходы	14 (шесть из которых могут использоваться как выходы ШИМ)
Флэш-память	32 Кб (ATmega328), из которых 0,5 Кб используется для загрузчика
Тактовая частота	16 МГц

На основе применяемого оборудования разработана принципиальная схема экспериментальной установки для фиксирования изменения температур воздуха окружающей среды и вечномерзлого грунта (рис. 3).

Для изучения эффективности применения САУ процессом охлаждения обсадной трубы фундаментной сваи и околовсвайного вечномерзлого грунта создана экспериментальная установка, представляющая собой плату микроконтроллера Arduino Uno 1, макетную плату 2, модуль Пельтье (термоэлектрический модуль 3), датчик температуры окружающей среды 4, зеленый светодиод 5з, красный светодиод 5к (рис. 4).

Построение модели и моделирование САУ процессом охлаждения обсадной трубы фундаментной сваи и околовсвайного вечномерзлого грунта реализовано в общетехническом шаблоне среды SimInTech (рис. 5).

Технической проблемой, решаемой изобретением [12], является повышение эффективности процесса охлаждения грунтов «путем обеспечения непосредственного охлаждения околовсвайного пространства фундамента с использованием САУ» [12, с. 1].

Согласно изобретению [12], термоэлектрические модули установлены на каждой обсадной трубе сваи фундамента.

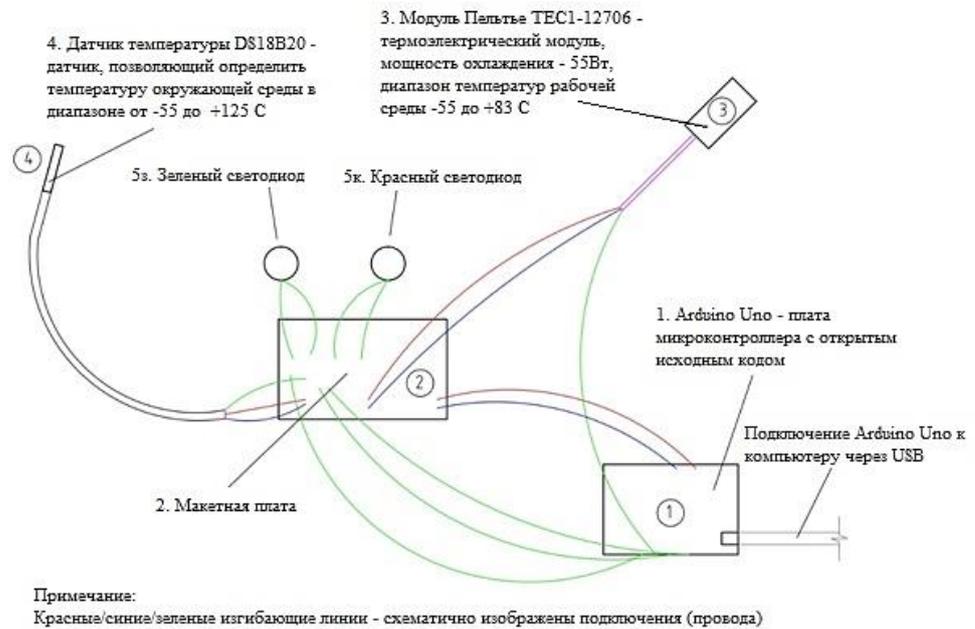


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментальной установки

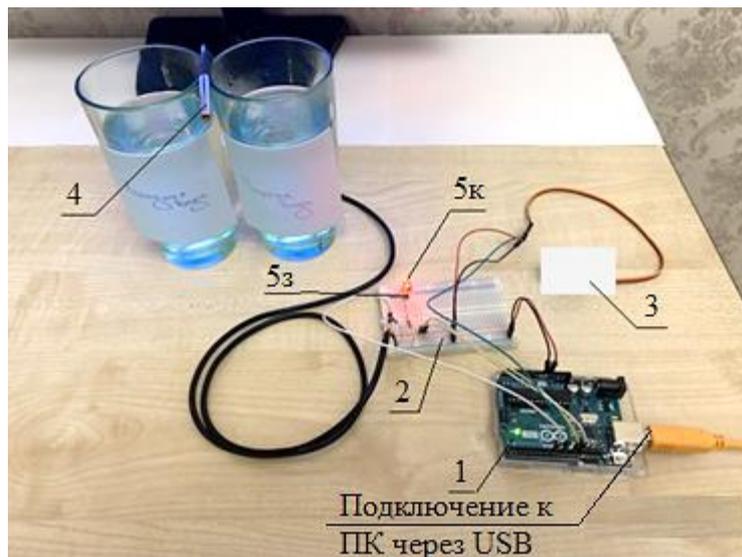


Рис. 4. Экспериментальная установка

На фиг. 1 схематично показан фрагмент устройства для стабилизации мерзлого грунта свайного фундамента с обсадными трубами; на фиг. 2 – то же, сечение А-А на фиг. 1; на фиг. 3 – то же, сечение Б-Б на фиг. 1; на фиг. 4 приведена структурная схема системы автоматического управления процессом охлаждения околосвайного пространства фундамента (рис. 6) [12, с. 2].

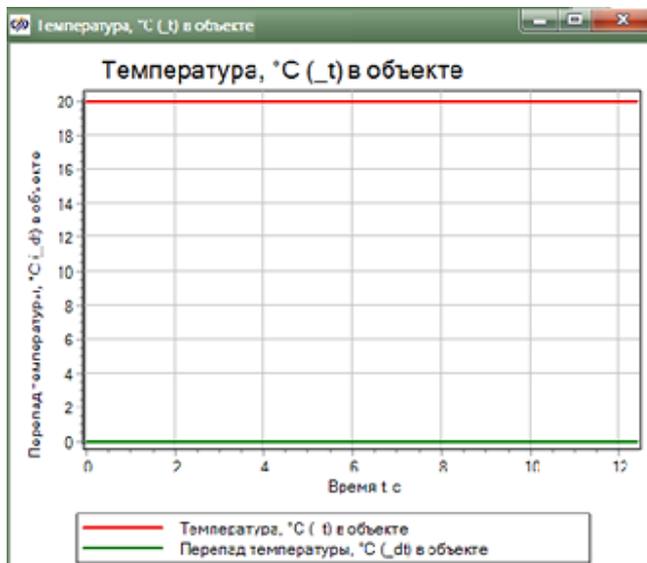
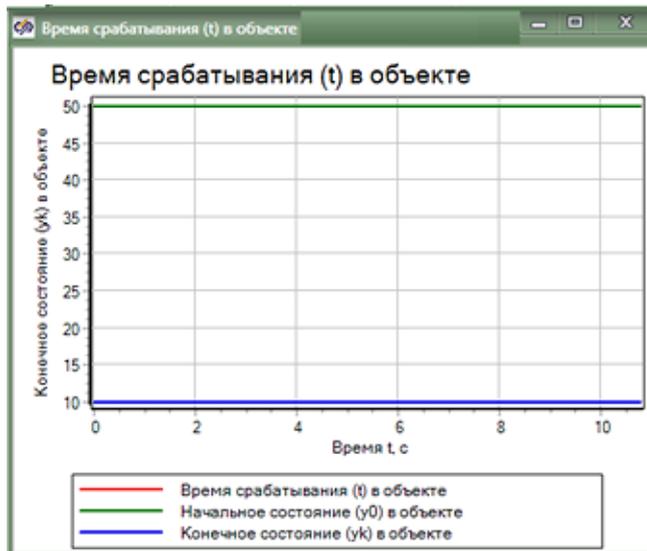
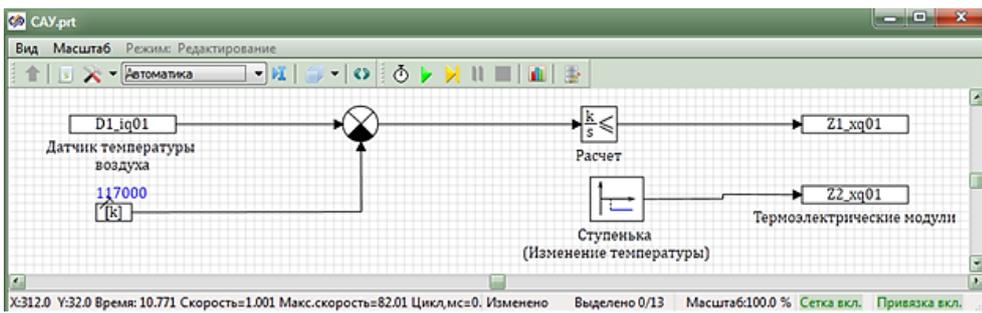


Рис. 5. Модель ориентации термоэлектрических модулей к температурным изменениям окружающей среды

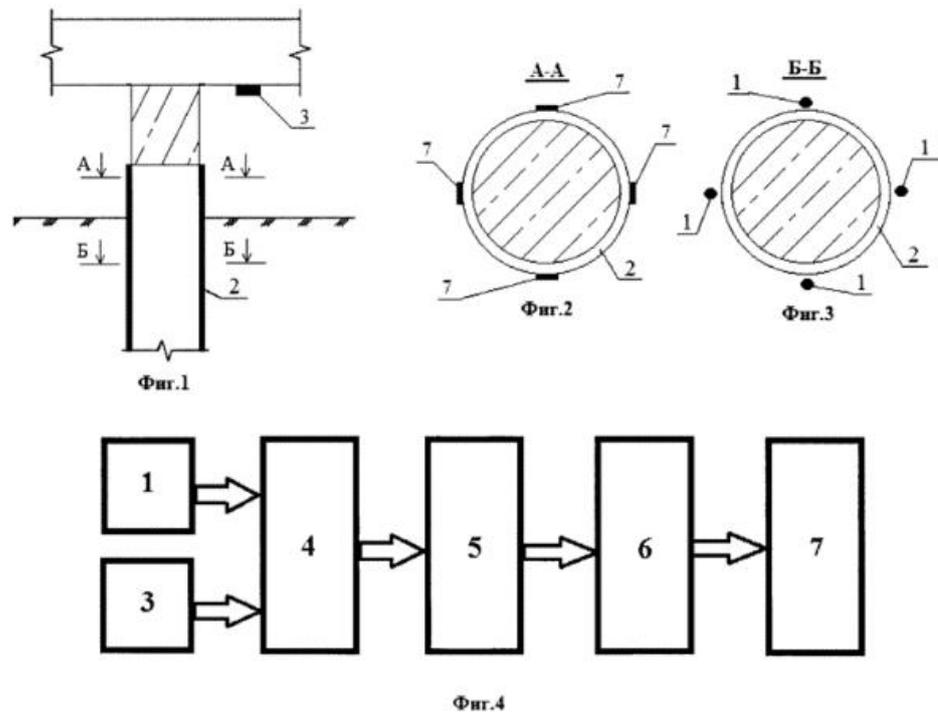


Рис. 6. Устройство для стабилизации мерзлого грунта свайного фундамента с обсадными трубами:

1 – датчики температуры; 2 – металлическая обсадная труба; 3 – датчик температуры воздуха окружающей среды; 4 – устройство ввода; 5 – блок перепрограммируемого постоянно запоминающего устройства (ППЗУ); 6 – устройство вывода; 7 – термоэлектрические модули

По итогам проведения экспериментальных исследований и моделирования САУ процессом охлаждения обсадной трубы фундаментной сваи и околосвайного вечномерзлого грунта можно сделать следующие выводы.

Выводы

1. Разработана принципиальная схема экспериментальной установки для фиксирования изменения температур воздуха окружающей среды и вечномерзлого грунта.

2. Для изучения эффективности применения системы автоматического управления (САУ) процессом охлаждения обсадной трубы фундаментной сваи и околосвайного вечномерзлого грунта создана экспериментальная установка и выполнено моделирование САУ в программном комплексе SimInTech. Система автоматического управления обеспечивает программное управление термоэлектрическими модулями в автоматическом режиме с целью наилучшей их ориентации на температуру воздуха окружающей среды в зависимости от температуры массива грунта в околосвайном пространстве фундамента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ложкин А.О., Ходаков П.А. Исследование стабильности геодезических центров в районе вечной мерзлоты // Геодезия и картография. 2012. № 3. С. 21–26.
2. Jafarov E.E., Marchenko S.S., Romanovsky V.E. Numerical modeling of permafrost dynamics in Alaska using a high spatial resolution dataset // The Cryosphere. 2012. V. 6. № 3. P. 613–624.
3. Амельчугов С.П., Инжутов И.С., Климов А.С. и др. Проблемы безопасности зданий арктического региона Восточной Сибири // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций : сб. статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, 26 апреля 2019 г. Железногорск, 2019. С. 166–172.
4. Nicolsky D.J., Romanovsky V.E., Panteleev G.G. Estimation of soil thermal properties using in-situ temperature measurements in the active layer and permafrost // Cold Regions Science and Technology. 2009. V. 55. № 1. P. 120–129.
5. Филимонов М.Ю., Ваганова Н.А. Моделирование термостабилизации грунта при эксплуатации инженерных объектов в условиях арктических и субарктических регионов // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2017. Т. 1. № 2. С. 391–401.
6. Абу-Хасан М.С., Егоров В.В., Куправа Л.П., Чарник Д.Г. Термостабилизация вечноммерзлых грунтов при возведении сооружений в северных климатических зонах // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2019. № 4 (1016). С. 40–42.
7. Суриков В.И., Коротков А.А., Мельникова Е.А. Исследования условий эксплуатации устройств термостабилизации грунтов с учетом воздействия технических объектов на многолетнемерзлые грунты // Нефтяное хозяйство. 2017. № 8. С. 116–119.
8. Inzhutov I.S., Zhadanov V.I., Semenov M.Yu., Klimov A.S., Amelchugov S.P. A comparative analysis of foundation design solutions on permafrost soils // E3S Web of Conferences. 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE 2018. 2019. 110. P01019. DOI 10.1051/e3sconf/201911001019
9. Окороков Н.С., Коркишко А.Н., Коржикова А.П. Экспериментальное исследование принудительно вентилируемой сваи // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 5. С. 665–677.
10. Патент № 2620664 Российская Федерация. Способ термостабилизации многолетнемерзлых грунтов и устройство для его реализации : № 2015156875 : заявл. 30.12.2015 : опубл. 29.05.2017 / Ревель-Муроз П.А., Лисин Ю.В., Сощенко А.Е., Суриков В.И., Татаруров С.Б. ; патентообл. ПАО «Транснефть», ООО «Транснефть-Восток», ООО «НИИ Транснефть». Бюл. № 16.
11. Патент № 150908 Российская Федерация. Устройство для термостабилизации грунтов : № 2014137685 : заявл. 17.09.2014 : опубл. 10.03.2015 / Горелик Я.Б., Мельников В.П., Фахретдинов И.З., Штоль В.Ф., Горелик Р.Я. ; патентообл. ООО ИП «Снежинка». Бюл. № 7.
12. Патент № 2681161 Российская Федерация. Устройство для стабилизации мерзлого грунта свайного фундамента с обсадными трубами : № 2018120836 : заявл. 05.06.2018 : опубл. 04.03.2019 / Климов А.С., Амельчугов С.П., Инжутов И.С. ; патентообл. ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Бюл. № 7.

REFERENCES

1. Lozhkin A.O., Khodakov P.A. Issledovanie stabil'nosti geodezicheskikh tsentrov v raione vechnoi merzloty [Stability of geodetic centers in the permafrost region]. *Geodeziya i kartografiya*. 2012. No. 3. Pp. 21–26. (rus)
2. Jafarov E.E., Marchenko S.S., Romanovsky V.E. Numerical modeling of permafrost dynamics in Alaska using a high spatial resolution dataset. *The Cryosphere*. 2012. V. 6. No. 3. Pp. 613–624.
3. Amel'chugov S.P., Inzhutov I.S., Klimov A.S. et al. Problemy bezopasnosti zdanii arkticheskogo regiona Vostochnoi Sibiri [Problems of building safety in the Arctic region of Eastern Siberia]. Aktual'nye problemy obespecheniya pozharnoi bezopasnosti i zashchity ot chrezvychainykh situatsii: sb. statei po materialam Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Proc. All-Russian Sci. Conf. 'Relevant Problems of Fire Safety and Protection from Emergency Situations'), Zheleznogorsk, 2019. Pp. 166–172. (rus)

4. *Nicolosky D.J., Romanovsky V.E., Panteleev G.G.* Estimation of soil thermal properties using in-situ temperature measurements in the active layer and permafrost. *Cold Regions Science and Technology*. 2009. V. 55. No. 1. Pp. 120–129.
5. *Filimonov M.Yu., Vaganova N.A.* Modelirovanie termostabilizatsii grunta pri ekspluatatsii inzhenernykh ob"ektov v usloviyakh arkticheskikh i subarkticheskikh regionov [Modeling of soil thermal stabilization during the operation of engineering objects in the Arctic and subarctic regions]. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemnyi analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem*. 2017. V. 1. No. 2. Pp. 391–401. (rus)
6. *Abu-Khasan M.S., Egorov V.V., Kuprava L.R., Charnik D.G.* Termostabilizatsiya vechnomerzlykh gruntov pri vozvedenii sooruzhenii v severnykh klimaticheskikh zonakh [Thermal stabilization of permafrost soils in building construction in northern climatic conditions]. *Byulleten' stroitel'noi tekhniki*. 2019. No. 4 (1016). Pp. 40–42. (rus)
7. *Surikov V.I., Korotkov A.A., Mel'nikova E.A.* Issledovaniya uslovii ekspluatatsii ustroystv termostabilizatsii gruntov s uchetoм vozdeistviya tekhnicheskikh ob"ektov na mnogoletnemerzlye grunty [Operating conditions of soil thermal stabilization devices with impact of technical objects on permafrost soils]. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2017. No. 8. Pp. 116–119. (rus)
8. *Inzhutov I.S., Zhadanov V.I., Semenov M.Yu., Klimov A.S., Amelchugov S.P.* A comparative analysis of foundation design solutions on permafrost soils. *E3S Web of Conferences. International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development*. 2019. V. 110. P01019. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001019
9. *Okorokov N.S., Korkishko A.N., Korzhikova A.P.* Eksperimental'noe issledovanie prinuditel'no ventiliruemoi svai [Experimental study of forcibly ventilated pile]. *Vestnik MGSU*. 2020. V. 15. No. 5. Pp. 665–677. (rus)
10. *Revel'-Muroz P.A., Lisin Yu.V., Soshchenko A.E., Surikov V.I., Tataurov S.B.* Sposob termostabilizatsii mnogoletnemerzlykh gruntov i ustroystvo dlya ego realizatsii [Method and device of permafrost soil thermal stabilization]. Patent Russ. Fed. N 2620664, 2017. (rus)
11. *Gorelik Ya.B., Mel'nikov V.P., Fakhretdinov I.Z., Shtol' V.F., Gorelik R.Ya.* Ustroystvo dlya termostabilizatsii gruntov [Device for soil thermal stabilization]. Patent Russ. Fed. N 2014137685, 2015. (rus)
12. *Klimov A.S., Amel'chugov S.P., Inzhutov I.S.* Ustroystvo dlya stabilizatsii merzlogo grunta svainogo fundamenta s obsadnymi trubami [Device for frozen soil stabilization of pile foundation with casing pipes]. Patent Russ. Fed. N 2681161, 2019. (rus)

Сведения об авторах

Климов Алексей Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, AKlimov@sfu-kras.ru

Емельянов Рюрик Тимофеевич, докт. техн. наук, профессор, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, ert-44@yandex.ru

Чумакова Екатерина Витальевна, студентка, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, katyasprouse@yandex.ru

Климова Оксана Леонидовна, студентка, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, oksana_88_@mail.ru

Authors Details

Alexey S. Klimov, PhD, A/Professor, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia, AKlimov@sfu-kras.ru

Rurik T. Emelyanov, DSc, Professor, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia, ert-44@yandex.ru

Ekaterina V. Chumakova, Student, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, katyasprouse@yandex.ru

Oksana L. Klimova, Student, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, oksana_88_@mail.ru

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

УДК 625.042:551.501.777(575.2) DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-147-158

*В.Н. ЕФИМЕНКО¹, С.В. ЕФИМЕНКО¹,
Э.М. КАРИМОВ², Г.Т. МАМАЖАКЫПОВА²,*

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,

²Ошский технологический университет

ПРИКЛАДНОЕ ЗНАЧЕНИЕ СПУТНИКОВОЙ МОДЕЛИ ТМРА ПРИ УСТАНОВЛЕНИИ НОРМЫ ГОДОВОГО КОЛИЧЕСТВА АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ ПО ДОРОЖНО-КЛИМАТИЧЕСКИМ ЗОНАМ НА ТЕРРИТОРИИ ЮГО-ЗАПАДНОГО КЫРГЫЗСТАНА

В статье рассмотрено прикладное значение спутниковой модели ТМРА при установлении нормы годового количества атмосферных осадков по дорожно-климатическим зонам на территории Республики Кыргызстан.

Увлажнение земляного полотна в регионе исследования в значительной мере зависит от количества атмосферных осадков. Уровень грунтовых вод на территории исследования преимущественно находится глубоко и не оказывает влияния на процессы влагонакопления в грунтах рабочего слоя земляного полотна. С учетом того, что прочность и устойчивость грунтов рабочего слоя земляного полотна подвержены влиянию водно-тепловых процессов, в статье приведены результаты оценки влагонакопления в дорожных конструкциях на основе спутниковых данных изучения выпадения осадков на территории Кыргызстана.

Ключевые слова: спутниковая модель ТМРА; атмосферные осадки; испарение с поверхности суши; уровень грунтовых вод; водный баланс; автомобильная дорога; земляное полотно; дорожно-климатическая зона.

Для цитирования: Ефименко В.Н., Ефименко С.В., Каримов Э.М., Мамажакыпова Г.Т. Прикладное значение спутниковой модели ТМРА при установлении нормы годового количества атмосферных осадков по дорожно-климатическим зонам на территории Юго-Западного Кыргызстана // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 147–158. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-147-158

V.N. EFIMENKO¹, S.V. EFIMENKO¹,
E.M. KARIMOV², G.T. MAMAGAKIPOVA²,

¹Tomsk State University of Architecture and Building,

²Osh Technological University

TMPA SATELLITE MODEL APPLIED FOR DETERMINATION OF ANNUAL PRECIPITATIONS IN ROAD BUILDING CLIMATIC ZONES IN SOUTHWEST KYRGYZSTAN

The article deals with the TMPA satellite model applied for determination of the annual quantity of precipitations in road building climatic zones on the territory of the Republic of Kyrgyzstan. The subgrade humidification in this region largely depends on the precipitation quantity. The ground water level is rather low and does not affect the moisture accumulation in subgrade soils. The strength and stability of subgrade soils are subject to the influence of water and heat balance of the road pavement. The results of the moisture accumulation analysis in the road structures are obtained by using the data obtained from the TMPA satellite on the annual quantity precipitation in the territory of the Republic of Kyrgyzstan.

Keywords: TMPA satellite model; precipitation; ground water level; water balance; automobile road; subgrade; road building climatic zone.

For citation: Efimenko V.N., Efimenko S.V., Karimov E.M., Mamagakipova G.T. Prikladnoe znachenie sputnikovoi modeli TMPA pri ustanovlenii normy godovogo kolichestva atmosferykh osadkov po dorozhno-klimaticheskim zonom na territorii yugo-zapadnogo Kyrgyzstana [TMPA satellite model applied for determination of annual precipitations in road-building climatic zones in southwest Kyrgyzstan]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 4. Pp. 147–158.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-147-158

Введение

В зависимости от гидрогеологических условий местности, типа покрытия и условий водоотвода земляное полотно в районе исследования может увлажняться за счет следующих источников [1]:

– атмосферных осадков, выпадающих на протяжении осени, зимы и весны, которые просачиваются через обочины и откосы к грунтовому основанию, а также в места неудовлетворительного состояния водонепроницаемого покрытия (выбоины, трещины, места необеспеченного водоотвода);

– поверхностных вод, которые вследствие затрудненного водоотвода могут увлажнять грунтовое основание путем капиллярного и плёночного передвижения воды;

– грунтовых вод или верховодок. При близком залегании грунтовых вод (осенний уровень находится на глубине, меньшей, чем глубина промерзания, плюс высота капиллярного поднятия воды в грунте) и в глинистых или пылеватых грунтах происходит постоянное капиллярно-восходящее увлажнение грунтов земляного полотна;

– плёночной воды, которая в промерзающих грунтах перемещается в зоне фазовых температур за счет миграции влаги из нижележащих талых слоев;

– парообразной воды, которая может перемещаться в порах грунта под влиянием даже незначительных температурных градиентов в область пониженного давления. Увлажнение грунтов земляного полотна происходит за счет конденсации паров.

Закон сохранения материи применительно к процессу влагообмена между деятельным слоем земли и атмосферой для некоторого промежутка времени принято записывать в виде уравнения водного баланса участка суши [2]:

$$r = q_c - q_u + q_v, \quad (1)$$

где r – сумма осадков за рассматриваемый период времени; q_c ; q_u ; q_v – соответственно сток, испарение и впитывание влаги для единичной поверхности.

Увеличение влажности грунта земляного полотна за счет инфильтрации атмосферных осадков может наступать с момента выполнения условия [1]:

$$r - q_u > 0. \quad (2)$$

Испарение с поверхности суши наряду с атмосферными осадками оказывает существенное влияние на влагонакопление в грунтах транспортных сооружений. Учитывая ограниченное число метеостанций, которые ведут систематические наблюдения за испарением, проф. И.А. Золотарь, исходя из положений теории турбулентной диффузии, предложил следующую зависимость для расчёта величины среднемесячного испарения с поверхности дорожного полотна [3]:

$$J = \frac{25,5(1 - f_{200})U_\Phi \left(1 + 1,8 \frac{Q'_R - 1,8J}{U_\Phi^{2,5}}\right) \exp(0,063\Theta_{200}) \exp\left(0,063 \frac{Q'_R - 1,8J}{U_\Phi^{0,5}}\right)}{7,49 + \ln\left[\left(1 + 1,8 \frac{Q'_R - 1,8J}{U_\Phi^{2,5}}\right)U_\Phi\right]}, \quad (3)$$

где f_{200} – относительная влажность воздуха на высоте 200 см, д. ед.; U_Φ – скорость ветра на высоте флюгера, м/с²; Θ_{200} – среднемесячная температура воздуха на высоте 200 см, °С.

Величину Q'_R можно вычислить по формуле [3]:

$$Q'_R = 3,34\{S_0[1 - (1 - k)n](1 - \gamma) - I_0(1 - C_0n^2)\}, \quad (4)$$

где S_0 – суммарная радиация при безоблачном небе, ккал/см²месяц; k – коэффициент, показывающий, какая доля солнечной радиации, поступающей на верхнюю границу облаков, доходит до земной поверхности при наличии полной облачности; n – средняя облачность, д. ед. (по метеоданным); γ – альbedo поверхности, д. ед; I_0 – эффективное излучение при безоблачном небе, ккал/см²месяц; C_0 – коэффициент, зависящий от географической широты местности.

Отметим, что ранее, из-за ограниченных вычислительных возможностей при решении трансцендентного уравнения (3), исследователи оперировали приближёнными методами. Соответственно, обеспечить требуемую достоверность результатов расчётов не представлялось возможным. При определении величины J для ряда опорных пунктов на территории Западной Сибири нами применён метод Ньютона [4]. Суть метода заключается в том, что поиск результатов

решения осуществляют путём построения последовательных приближений (принципа простой итерации) [5].

Методы

Наряду с испарением с поверхности суши инфильтрация атмосферных осадков является одним из определяющих климатических факторов географического комплекса в Республике Кыргызстан. Территория Кыргызстана характеризуется значительными перепадами высотных отметок, рельеф преимущественно горный. По этой причине прогнозирование и изучение закономерностей изменения сумм атмосферных осадков является сложной задачей. В этом направлении трудились такие ученые, как П.Н. Пономаренко, В.А. Бугаев, А.А. Григорьев, В.А. Кузьмиченко, С.У. Умурзаков, О.А. Подрезов, С.К. Аламанов, Чен Хи, О.Ю. Калашников, М.Т. Баканов, А.Н. Диких, И.А. Павлова, М.О. Рыскаль и др.

При проектировании, строительстве и эксплуатации линейных объектов транспортной инфраструктуры необходимо учитывать количество и характер атмосферных осадков. Однако достоверность информации о них для территории Республики Кыргызстан сомнительна, а иногда неправильно используется в гидрологических моделях. Основной причиной такого положения является отсутствие системного мониторинга, необходимого для оценки сведений о количестве атмосферных осадков, величине поверхностного стока, влагонакоплении в рабочем слое земляного полотна и пополнении информационных запасов для заинтересованных организаций [6–11]. Следует учесть, что модели, позволяющие вести детальный учёт увлажнённости территорий, необходимы в том числе при корректировке действующих в республике строительных норм и правил.

Достижения в области дистанционного зондирования [12] показали многообещающие результаты, в том числе при оценке влагонакопления в грунтах земляного полотна.

В настоящее время на территории Кыргызстана выполняют свои функции 35 метеорологических станций. Такое количество пунктов наблюдения за метеорологическими показателями не покрывает всю территорию Республики Кыргызстан и является явно недостаточным, поскольку для качественного решения задач прогноза сеть станций должна включать пункты, расположенные на расстоянии 7 км один от другого. Кыргызстан – горная страна, расположенная в сложных геоклиматических условиях, поэтому процедура изучения увлажнённости территории является важной задачей.

С развитием научно-технического прогресса и применением данных, полученных при помощи спутников, выполняющих наблюдения за метеорологическими и гидрогеологическими параметрами, изучение увлажнённости горных территорий становится решаемой задачей.

Современные спутниковые наблюдения за осадками широко используются во многих странах и характеризуются положительными результатами. Однако их применение в горных районах требует решения ряда дополнительных задач по адаптации сведений по орографическим условиям конкретных регионов. М.О. Рыскаль впервые для горной территории Кыргызстана исполь-

зовал мультиспутниковую модель ТМРА-3В43 (Tropical Rainfall Measuring Mission Multi-satellite Precipitation Analysis) для расчета годовых и сезонных сумм осадков в его различных орографических и высотных зонах [13, 14].

Для климатической провинции Юго-Западного Кыргызстана (ЮЗК) по отмеченному методу за период с 1990 по 2015 г. получено 138 точек узлов регулярной сетки. Некоторые корреляционные связи и регрессионные зависимости спутниковых и наземных данных для годовых осадков ЮЗК провинции представлены в табл. 1 [15–17].

Таблица 1

Некоторые результаты спутниковых наблюдений за осадками в 2015 г. для территории ЮЗК

№ п/п	Долгота	Широта	Исходные спутниковые значения годовых сумм осадков X (сп., мм)	Приведенное значение годовых сумм осадков Y (прив., мм)
1	71,625	42,125	674,744568	919,653936
2	71,875	42,125	754,528687	1047,268634
3	72,375	42,125	770,254272	1072,421708
4	72,625	42,125	931,585022	1330,470242
5	70,875	41,875	817,976318	1148,753120
6	71,125	41,875	648,231079	877,245610
7	71,375	41,875	606,95459	811,223866
...
...
132	73,625	39,625	255,559921	249,168094
133	73,875	39,625	258,809021	254,365029
134	71,875	39,375	514,543762	663,412747
135	72,125	39,375	450,933167	561,667601
136	72,375	39,375	417,784943	508,647016
137	72,875	39,375	358,647888	414,057297
138	73,125	39,375	276,039642	258,925407

Приведенные спутниковые суммы атмосферных осадков являются репрезентативными (показательными) величинами для дальнейшего анализа поля осадков, для этой сложной и недостаточно изученной сотрудниками метеостанций горной территории. Это позволяет открыть широкие возможности для практического применения спутниковых наблюдений в прикладной климатологии, в том числе для других территорий, характеризующихся сложными показателями географического комплекса.

Одновременно установление таких зависимостей является еще одним методом валидации спутниковых данных [15]. Расчет корреляции и регрессии для

годовых осадков по климатическим провинциям Республики Кыргызстан выполнен с применением следующей зависимости (5):

$$Y = b_1 \cdot X - b_0, \quad (5)$$

где Y (прив., мм) – приведенное значение годовых сумм осадков после корреляции и регрессии; b_1 – угловой коэффициент; X (сп., мм) – исходные спутниковые значения годовых сумм осадков в мм; b_0 (мм) – остаточный член. На следующем этапе исследований выделено 138 точек на сетке спутниковых точек. В настоящее время в программном комплексе ArcMap создана карта-схема, отражающая сетку спутниковых точек модели TMPA-3B43, покрывающую территорию Юго-Западного Кыргызстана (ЮЗК) (рис. 1) [14].

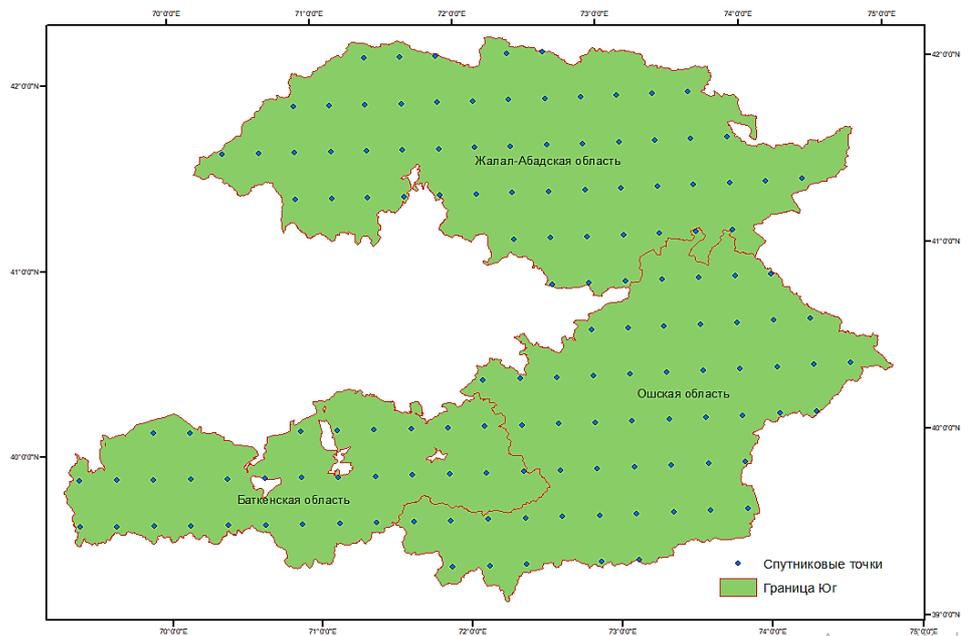


Рис. 1. Сетка спутниковых точек модели TMPA-3B43, покрывающая территорию ЮЗК (размер ячейки $0,25 \times 0,25^\circ$)

В анализируемой работе интерполирование выполнялось методом обратных взвешенных расстояний (IDW) и кригинга (Kriging).

Метод обратных взвешенных расстояний (IDW) является одним из наиболее распространенных методов интерполяции. IDW определяет значения ячеек с помощью линейно-взвешенного набора опорных точек. Определенный вес является функцией расстояния от точки ввода до вывода ячейки. Чем больше расстояние, тем меньше влияние ячейки на значения выходной величины. Основная идея метода IDW заключается в том, что величины значений точек, близких друг к другу по расстоянию, как правило, более похожи, чем значения точек, расположенных дальше друг от друга [18].

Другой метод, Kriging, относится по классификации к методам нелинейной интерполяции и является синонимом «оптимального прогнозирования».

ния». Этот метод определяет неизвестные значения по данным наблюдений с известным пространственным положением, используя вариограммы для передачи изменений и минимизации ошибок, определяемых значений. В методе Kriging предполагают, что расстояние или направление между опорными точками отражает пространственную корреляцию, которая может использоваться для объяснения изменения на поверхности.

Результаты

Таким образом, с помощью мультиспутниковой модели ТМРА-3В43 можно определить величину годовых и сезонных осадков для решения задач, связанных с прогнозом влагонакопления в рабочем слое земляного полотна. На рис. 2 отражена карта-схема сумм атмосферных осадков на территории ЮЗК, полученных за период с 1990 по 2015 г.

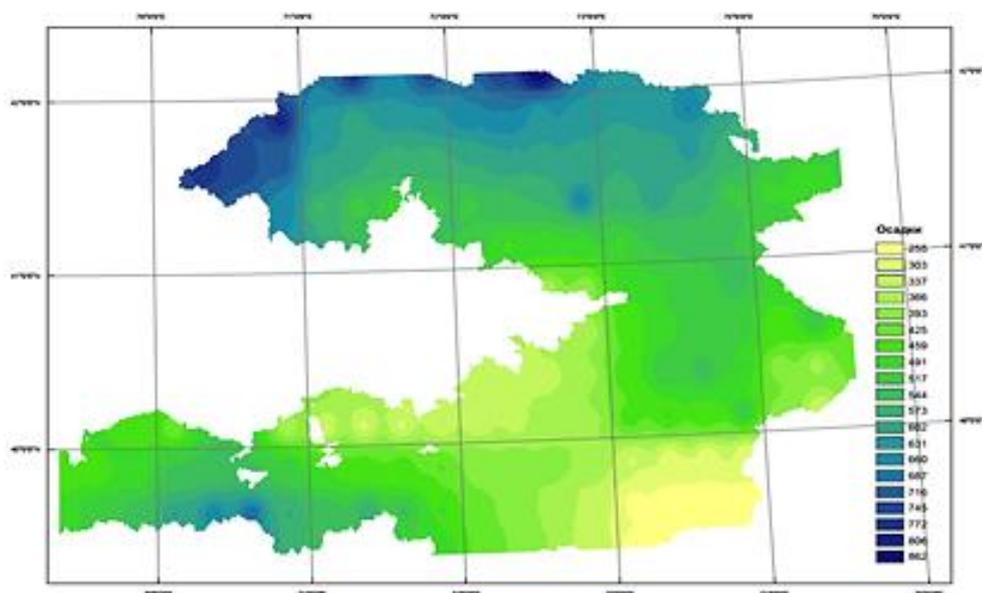


Рис. 2. Карта-схема сумм атмосферных осадков климатической провинции ЮЗК за период наблюдений с 1990 по 2015 г.

Высотная климатическая зональность является главной чертой, присущей горному климату. В горной местности высотные зависимости годовых и, соответственно, сезонных сумм осадков прослеживаются довольно четко, при этом осадки считаются важнейшим элементом горного климата. Согласно ранее выполненным исследованиям [19], осадки (табл. 2) и высотные отметки (рис. 3) считаются главными факторами, характеризующими территории дорожно-климатических зон в Кыргызской Республике (СНиП КР 32-01:2004 Проектирование автомобильных дорог).

Однако высотные зависимости большинства метеорологических величин сильно искажены и замаскированы влиянием макро-, мезо- и микрорельефных условий местности [20, 21]. С учетом высотных зависимостей осадков

в Юго-Западном Кыргызстане с помощью результатов мультиспутниковой модели ТМРА-3В43 составлена карта фактической годовой нормы атмосферных осадков ЮЗК за период с 1990 по 2015 г., на которой рельеф местности представлен как доминанта (рис. 3).

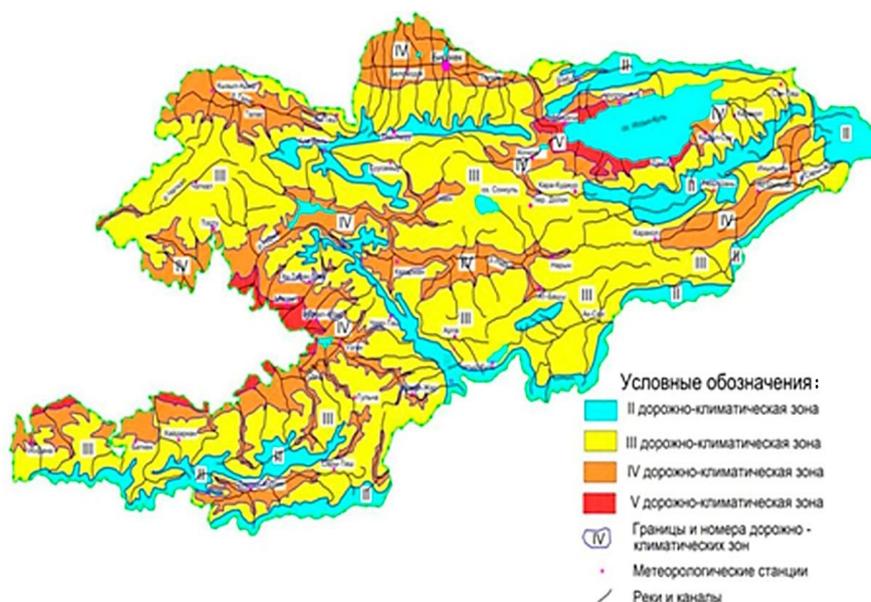


Рис. 3. Карта-схема дорожно-климатического районирования Республики Кыргызстан

Таблица 2

Характеристика дорожно-климатических зон территории Республики Кыргызстан

Дорожно-климатическая зона	Абсолютные высоты зоны над уровнем моря, м	Годовое количество осадков, мм
II	Свыше 2800	Свыше 800
III	1600–2800	От 500 до 800
IV	700–2500	От 300 до 500
V	500–1700	От 120 до 300

Обсуждение

Анализируя в целом распределение среднегодовых сумм осадков по всей территории Кыргызстана (см. рис. 2), можно заметить, что основные зоны максимумов и минимумов осадков представлены достаточно чётко. Однако как по очертанию и площади выделенных территорий, так и по количеству осадков, выпадающих на них, имеются заметные различия, не совпадающие по значениям величин осадков с высотными отметками, приведёнными в табл. 2. Можно,

например, отметить, что по большей части Ошской области годовые суммы осадков (рис. 2) лежат в пределах 450–550 мм и лишь вблизи наземных станций имеют порядок 800–1000 мм. При этом, по данным многолетних климатических наблюдений, известно, что здесь повсеместно количество выпадающих осадков составляет 700–800 мм. Устранение выявленных недостатков при уточнении дорожно-климатического районирования территории Республики Кыргызстан – предмет наших дальнейших исследований.

Заключение

Полученные результаты коренным образом меняют сложившиеся представления о технологических аспектах дорожно-климатического районирования Республики Кыргызстан.

При уточнении дорожно-климатического районирования горных территорий с помощью спутниковой модели ТМРА-3В43 можно получить карты-схемы, характеризующие количество атмосферных осадков, участвующих в увлажнении рабочего слоя земляного полотна автомобильных дорог Республики Кыргызстан.

Влияние климатических условий на дорожные конструкции в сложных в инженерно-геологическом плане районах горной местности очень велико. Поэтому определение значений, характеризующих количество атмосферных осадков в научно-практическом направлении, упрощает решение инженерных задач в дорожной отрасли.

С помощью спутниковой модели ТМРА-3В43 установлено несоответствие норм годового количества атмосферных осадков (мм) по дорожно-климатическим зонам Кыргызстана относительно абсолютной высоты ДКЗ над уровнем моря (м).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд* / под ред. И.А. Золотаря, Н.А. Пузакова, В.М. Сиденко. Москва : Транспорт, 1971. 416 с.
2. *Мезенцев В.С., Карнацевич И.В.* Гидролого-климатическая характеристика Западно-Сибирской равнины // Тепловой и водный режим некоторых районов Сибири. Ленинград : Наука, 1970. С. 23–42.
3. *Золотарь И.А.* Расчет испарения с поверхности грунтовых оснований в связи с прогнозом их влажностного состояния // Экспериментальные исследования процессов теплообмена в мерзлых горных породах. Новосибирск : Наука, 1972. С. 119–137.
4. *Zakharov A.A., Hazewinkel M.* Borel summation method // Encyclopedia of mathematics, springer, 2001. URL: https://www.encyclopediaofmath.org/index.php/Borel_summation_method
5. *Ефименко С.В., Сухоруков А.В., Ефименко В.Н.* Уточнение схемы расчёта величины испарения с поверхности грунтовых оснований автомобильных дорог при формировании информационной базы для прогнозирования их влажности // Транспорт и дороги Казахстана. 2013. № 4 (54). С. 21–24.
6. *Puca S., Porcu F., Rinollo A., Vulpiani G., Baguis P., Balabanova S., Campione E., Ertürk A., Gabellani S., Iwanski R., et al.* The validation service of the hydrological SAF geostationary and polar satellite precipitation products // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2014. 14 P. 871–889.
7. *Ricciardelli E., Cimini D., di Paola F., Romano F., Viggiano M.* A statistical approach for rain intensity differentiation using Meteosat Second Generation –Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager observations // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2014. 18. 2559–2576.

8. Casella D., Panegrossi G., Sano P., Dietrich S., Mugnai A., Smith E.A., Tripoli G.J., Formen-ton M., di Paola F., Leung W.-Y. Transitioning from CRD to CDRD in Bayesian retrieval of rainfall from satellite passive microwave measurements: Part 2. Overcoming database profile selection ambiguity by consideration of meteorological control on microphysics // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2013. 51. 4650–4671.
9. Mugnai A., Smith E., Tripoli G., Bizzarri B., Casella D., Dietrich S., di Paola F., Panegros-si G., Sanò P. CDRD and PNP satellite passive microwave precipitation retrieval algorithms: Eurotrmm/Eurainsat origins and H-SAF operations // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2013. 13. 887–912.
10. Sahoo A.K., Sheffield J., Pan M., Wood E.F. Evaluation of the tropical rainfall measuring mis-sion multi-satellite precipitation analysis (TMPA) for assessment of large-scale meteorological drought // Remote Sens. Environ. 2015. 159. 181–193.
11. Ghajarnia N., Liaghat A., DaneshkarArasteh P. Comparison and evaluation of high resolution precipitation Estimation products in Urmia Basin, Iran // Atmos. Res. 2015. 158–159. 50–65.
12. Giovanni // EarthDATA. URL: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
13. Рыскаль М.О. Оценка сумм осадков на территории Кыргызстана по данным спутнико-вых наблюдений : диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. Бишкек, 2020. 150 с.
14. Рыскаль М.О. Спутниковые карты годовых и сезонных сумм осадков для территории Кыргызстана // Дистанционные и наземные исследования Земли в Центральной Азии : ма-териалы Междунар. научной конф., посвящ. 15-летию ЦАИИЗ. Бишкек, 2019. С. 206–213.
15. Подрезов О.А. Горная климатология и высотная климатическая зональность Кыргызста-на. Бишкек, 2014. 169 с.
16. Подрезов О.А., Рыскаль М.О. Статистические связи и зависимости годовых и сезонных сумм осадков, получаемых по мультиспутниковой модели TMPA и наземным данным метеостанций для различных климатических провинций Кыргызстана // Научные иссле-дования в Кыргызской Республике. 2018. 3 квартал. С. 10–20. URL: journal.vak.kg/
17. Подрезов О.А., Рыскаль М.О. Сравнительный анализ спутниковых (TMPA 3B43) и наземных данных для годовых сумм осадков над горной территорией Кыргызстана // Сахаровские чтения 2019 года: экологические проблемы XXI века : сб. материалов 19-й Междунар. научн. конф. / МГЭИ им. А.Д. Сахарова БГУ. Минск, 2019. С. 96–98.
18. Как работает инструмент Кригинг (Kriging) // ArcGIS for Desktop. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm>
19. Маданбеков Н.Ж., Турдубай С. уулу, Исаков Р.Б., Омурбек Р. уулу. Характеристики до-рожно-климатического районирования // Вестник КГУСТА. 2015. № 2. С. 6–11.
20. Рыскаль М.О. Статические связи и зависимости сумм осадков, получаемых по мульти-спутниковой модели и наземным данным метеостанций для различных высотных зон Кыргызстана // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2018. № 10. С. 29–38.
21. Рыскаль М.О. Оценка годовых и сезонных сумм осадков для горных районов Кыргыз-стана, полученных по мультиспутниковой модели TMPA // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. 2018. Т. 18. № 12. С. 141–145.

REFERENCES

1. Zolotar' I.A., Puzakov N.A., Sidenko V.M. (Eds.) Vodno-teplovoy rezhim zemlyanogo polotna i dorozhnykh odezhd [Water and thermal balance of road subgrades and pavements]. Moscow: Transport, 1971. 416 p. (rus)
2. Mezeceev V.S., Karnacevich I.V. Gidrologo-klimaticheskaya harakteristika Zapadno-Sibirskoj ravniny [Hydrological and climatic characteristics of the West Siberian Plain]. In: Thermal and water regime of some regions of Siberia. Leningrad: Nauka, 1970. Pp. 23–42. (rus)
3. Zolotar' I.A. Raschet ispareniya s poverhnosti gruntovykh osnovanij v svyazi s prognozom ih vlazhnostnogo sostoyaniya Evaporation analysis of subgrade soil based on predicted humidity]. In: Experimental studies of heat transfer processes in frozen rocks. Novosibirsk: Nauka, 1972. Pp. 119–137. (rus).
4. Zakharov A.A., Hazewinkel M. Borel summation method. Encyclopedia of Mathematics. Springer, 2001.

5. Efimenko S.V., Suhorukov A.V., Efimenko V.N. Utochnenie skhemy raschyota velichiny ispareniya s poverhnosti gruntovyh osnovanij avtomobil'nyh dorog pri formirovanii informacionnoj bazy dlya prognozirovaniya ih vlazhnosti [Analysis of evaporation from subgrade soil for the information base for humidity prediction]. *Transport i dorogi Kazakhstana*. 2013. No. 4 (54). Pp. 21–24 (rus).
6. Puca S., Porcu F., Rinollo A., Vulpiani G., et al. The validation service of the hydrological SAF geostationary and polar satellite precipitation products. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2014. V. 14. Pp. 871–889.
7. Ricciardelli E., Cimini D., di Paola F., Romano F., Viggiano M. A Statistical approach for rain intensity differentiation using Meteosat Second Generation–Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager observations. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2014. V. 18. Pp. 2559–2576.
8. Casella D., Panegrossi G., Sano P., Dietrich S., Mugnai A., Smith E.A., Tripoli G.J., Formenton M., di Paola F., Leung W.-Y. Transitioning from CRD to CDRD in Bayesian retrieval of rainfall from satellite passive microwave measurements: Part 2. Overcoming database profile selection ambiguity by consideration of meteorological control on microphysics. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2013. V. 51. Pp. 4650–4671.
9. Mugnai A., Smith E., Tripoli G., Bizzarri B., Casella D., Dietrich S., di Paola F., Panegrossi G., Sanò P. CDRD and PNPR satellite passive microwave precipitation retrieval algorithms: Eurotrmm/Eurainsat origins and H-SAF operations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2013. V. 13. Pp. 887–912.
10. Sahoo A.K., Sheffield J., Pan M., Wood E.F. Evaluation of the tropical rainfall measuring mission multi-satellite precipitation analysis (TMPA) for assessment of large-scale meteorological drought. *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 159. Pp. 181–193.
11. Ghajarnia N., Liaghat A., DaneshkarArasteh P. Comparison and evaluation of high resolution precipitation. Estimation products in Urmia Basin. *Atmospheric Research*. 2015. V. 158–159. Pp. 50–65.
12. Giovanni. EarthDATA. Available: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni>
13. Ryskal' M.O. Ocenka summ osadkov na territorii Kyrgyzstana po dannym sputnikovyh nablyudenij. Dis. ... cand. geograph. sciences. [Estimation of the precipitation quantity in Kyrgyzstan based on satellite observations. PhD Thesis]. Bishkek, 2020. 150 p. (rus)
14. Ryskal' M.O. Sputnikovye karty godovyh i sezonnyh summ osadkov dlya territorii Kyrgyzstana [Satellite maps of annual and seasonal precipitations in Kyrgyzstan]. In: materialy Mezhdunar. nauchnoi konf. posvyashch. 15-letiyu TsAIIZ "Distantsionnye i nazemnye issledovaniya Zemli v Tsentral'noi Azii" (Proc. Int. Sci. Conf. 'Remote and Terrestrial Earth Studies in Central Asia'). Bishkek, 2019. Pp. 206–213. (rus)
15. Podrezov O.A. Gornaya klimatologiya i vysotnaya klimaticheskaya zonal'nost' Kyrgyzstana [Mountain climatology and vertical zonation of Kyrgyzstan]. Bishkek, 2014. 169 p. (rus)
16. Podrezov O.A., Ryskal' M.O. Statisticheskie svyazi i zavisimosti godovyh i sezonnyh summ osadkov, poluchaemyh po mul'ti sputnikovoj modeli TMPA i nazemnym dannym meteostancij dlya razlichnyh klimaticheskikh provincij Kyrgyzstana [Statistical relations and dependencies of annual and seasonal precipitations obtained from the TMPA satellite model and meteorological stations for various climatic provinces of Kyrgyzstan]. In: Scientific Report, 2018. Pp. 10–20. Available: joymal.vak.kg
17. Podrezov O.A., Ryskal' M.O. Sravnitel'nyj analiz sputnikovyh (TMPA 3V43) i nazemnyh dannyh dlya godovyh summ osadkov nad gornoj territoriej Kyrgyzstana [Comparative analysis of data from TMPA 3B43 satellite on annual precipitation in mountainous Kyrgyzstan]. In: Sakharovskie chteniya 2019 goda: ekologicheskie problemy XXI veka: sb. materialov 19-i Mezhdunar. nauchn. konf. (Proc. 19th Int. Sci. Conf. 'Sakharov Readings-2019'). 2019. Pp. 96–98 (rus)
18. Kak rabotaet instrument Kriging [How the Kriging tool works]. ArcGIS for Desktop. Available: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm>
19. Madanbekov N.Zh., Turdubaj S., uulu, Isakov R.B., Omurbek R., uulu. Harakteristiki dorozhno-klimaticheskogo rajonirovaniya [Characteristics of road building climatic zoning]. *Vestnik KGUSTA*. 2015. No. 2. Pp. 6–11. (rus)
20. Ryskal' M.O. Sticheskie svyazi i zavisimosti summ osadkov, poluchaemyh po mul'ti sputnikovoj modeli i nazemnym dannym meteostancij dlya razlichnyh vysotnyh zon Kyrgyzstana [Statistical relations and dependencies of annual and seasonal precipitations obtained from the

- TMPA satellite model and meteorological stations for high-level territories of Kyrgyzstan]. *Nauka, novye tekhnologii i innovatsii Kyrgyzstana*. 2018. No. 10. Pp. 29–38. (rus)
21. *Ryskal' M.O.* Ocenka godovyh i sezonnyh summ osadkov dlya gornyh rajonov Kyrgyzstana, poluchennyh po mul'tisputnikovoj modeli TMPA [Estimation of annual and seasonal precipitations for mountainous regions of Kyrgyzstan obtained from TMPA satellite model]. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiiskogo slavyanskogo universiteta*. 2018. V. 18. No. 12. Pp. 141–145. (rus)

Сведения об авторах

Ефименко Владимир Николаевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, svefimenko_80@mail.ru

Ефименко Сергей Владимирович, докт. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, svefimenko80@gmail.com

Каримов Эркинбек Машанович, канд. техн. наук, доцент, Ошский технологический университет, 723503, Кыргызская Республика, г. Ош, ул. Н. Исанова, 81, erkin.karimov.71@mail.ru

Мамажакыпова Гулзара Турдубаевна, ст. преподаватель, Ошский технологический университет, 723503, Кыргызская Республика, г. Ош, ул. Н. Исанова, 81, gulzara.mamazhakypova@mail.ru

Authors Details

Vladimir N. Efimenko, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, svefimenko_80@mail.ru

Sergei V. Efimenko, DSc, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, svefimenko80@gmail.com

Erkinbek M. Karimov, PhD, A/Professor, Osh Technological University, 81, Isanov Str., 723503, Osh, Kyrgyz Republic, erkin.karimov.71@mail.ru

Gulzara T. Mamazhakypova, Senior Lecturer, Osh Technological University, 81, Isanov Str., 723503, Osh, Kyrgyz Republic, gulzara.mamazhakypova@mail.ru