

ISSN 2782-232X (print)  
ISSN 2713-0770 (online)

# АСТ

## АРХИТЕКТУРА СТРОИТЕЛЬСТВО ТРАНСПОРТ

ARCHITECTURE • CONSTRUCTION • TRANSPORT



№ 3 (105)  
2023

16+



Научно-информационный журнал «Архитектура, строительство, транспорт» посвящен рассмотрению широкого круга вопросов теоретического и практического характера, направленных на решение проблем в области архитектуры, строительства и транспорта. Цель журнала – создать доступное информационно-коммуникационное пространство для обсуждения новых знаний, подходов в данных сферах и внедрения научных и технических достижений в практику.

#### Журнал выходит 4 раза в год

*Наименование и содержание рубрик журнала соответствуют отраслям науки и группам специальностей научных работников Номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени.*

- 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
- 2.1.2 Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки)
- 2.1.3 Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)
- 2.1.4 Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов (технические науки)
- 2.1.5 Строительные материалы и изделия (технические науки)
- 2.1.8 Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)
- 2.1.9 Строительная механика (технические науки)
- 2.1.11 Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура, технические науки, искусствоведение)
- 2.1.12 Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура, технические науки)
- 2.5.5 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 2.5.6 Технология машиностроения (технические науки)
- 2.5.11 Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки)
- 2.5.21 Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)
- 2.6.17 Материаловедение (по отраслям)
- 2.9.5 Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки)

The scientific and information journal "Architecture, Construction, Transport" ("Arkhitektura, stroitel'stvo, transport") addresses a wide range of theoretical and practical issues aimed at solving problems of architecture, construction, and transport. The purpose of the journal is to create an accessible information and communication space for discussing new knowledge and approaches in these areas and introducing scientific and technical achievements into practice.

#### The journal is published 4 times a year

*The name and content of the journal sections correspond to the branches of science and groups of specialties of scientific workers according to the Nomenclature of Scientific Workers' Specialties for which academic degrees are awarded.*

- 2.1.1 Construction structures, buildings and facilities (engineering sciences)
- 2.1.2 Bases and foundations, underground structures (engineering sciences)
- 2.1.3 Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and illumination (engineering sciences)
- 2.1.4 Water supply sewerage, construction systems for water resources protection (engineering sciences)
- 2.1.5 Construction materials and products (engineering sciences)
- 2.1.8 Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels (engineering sciences)
- 2.1.9 Structural mechanics (engineering sciences)
- 2.1.11 Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture, engineering sciences, art history)
- 2.1.12 Architecture of buildings and structures. Creative conceptions of architectural activity (architecture, engineering sciences)
- 2.2.5 Technology and equipment for mechanical, physical and technical processing (engineering sciences)
- 2.5.6 Machine-building technology (engineering sciences)
- 2.5.11 Ground transport and technological means and complexes (engineering sciences)
- 2.5.21 Machines, aggregates and technological processes (engineering sciences)
- 2.6.17 Materials science (by industry)
- 2.9.5 Operation of motor transport (engineering sciences)

## Учредители журнала

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (издатель)

Главное управление строительства Тюменской области

### Редакционная коллегия

*Мальцева Татьяна Владимировна*, д. ф.-м. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень – **главный редактор**

*Абдураманов Абдуманп Абдукаримович*, д. т. н., профессор, Таразский региональный университет им. М. Х. Дулати, Тараз (Республика Казахстан)

*Амирзода Ориф Хамид*, д. т. н., доцент, Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе (Республика Таджикистан)

*Арынов Калдыбай Канаевич*, доктор архитектуры, профессор, Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана (Республика Казахстан)

*Асенов Асен Цветанов*, PhD, доцент, Русенский университет имени Ангела Кынчева, Русе (Болгария)

*Барсуков Владимир Георгиевич*, д. т. н., доцент, Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно (Республика Беларусь)

*Бартоломей Леонид Адольфович*, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

*Бородинец Анатолий Викторович*, д. т. н., профессор, Рижский технический университет, Рига (Латвия)

*Ватин Николай Иванович*, д. т. н., профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

*Грдич Зоран*, д. т. н., профессор, Нишский университет, Ниш (Сербия)

*Захаров Николай Степанович*, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

*Ковенский Илья Моисеевич*, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

*Кудрявцев Сергей Анатольевич*, д. т. н., профессор, член-корреспондент РААСН, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

*Мамян Заруи Генриховна*, кандидат архитектуры, профессор, Национальный университет архитектуры и строительства Армении, Ереван (Республика Армения)

*Миронов Виктор Владимирович*, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

*Менендес Пидаль Игнасио*, PhD, профессор, Политехнический университет Мадрида, Мадрид (Испания)

### Редакционный совет

*Набоков Александр Валерьевич*, к. т. н., доцент, директор Строительного института, Тюменский индустриальный университет – **председатель**

*Перевалов Павел Анатольевич*, начальник Главного управления строительства Тюменской области

*Арбузова Зоя Геннадьевна*, заместитель генерального директора СРО Союз «Организация изыскателей Западносибирского региона»

*Катаева Елена Сергеевна*, директор Союза «Саморегулируемая организация строителей Тюменской области»

*Мерданов Шахбуба Магомедкеримович*, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

*Мурали Гунасекаран*, PhD, доцент, Университет SASTRA, Танджавур (Индия)

*Овчинников Евгений Витальевич*, д. т. н., профессор, Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно (Республика Беларусь)

*Овчинников Игорь Георгиевич*, д. т. н., профессор, действительный член Академии транспорта РФ, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

*Панфилов Александр Владимирович*, кандидат архитектуры, доцент, Департамент строительства, архитектуры и земельных отношений Администрации города Салехарда, Салехард

*Попок Николай Николаевич*, д. т. н., профессор, Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк (Республика Беларусь)

*Райчик Марлена*, д. т. н., профессор, Ченстоховский технологический университет, Ченстохова (Польша)

*Селехри Мехран*, PhD, доцент, Технологический университет имени Шарифа, Тегеран (Иран)

*Сладковски Александр Валентинович*, д. т. н., профессор, Силезский технический университет, Катовице (Польша)

*Соколов Владимир Григорьевич*, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

*Султанова Дилшода Намазовна*, доктор архитектуры, профессор, Самаркандский архитектурно-строительный институт, Самарканд (Республика Узбекистан)

*Тарасенко Александр Алексеевич*, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

*Уляшева Вера Михайловна*, д. т. н., профессор, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург

*Федюк Роман Сергеевич*, д. т. н., доцент, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

*Ци Чэнжи*, д. ф.-м. н., профессор, Пекинский университет гражданского строительства и архитектуры, Пекин (Китай)

*Чекардовский Михаил Николаевич*, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

*Чжао Вэнь*, PhD, профессор, Северо-Восточный университет, Шэньян (Китай)

*Никитин Андрей Юрьевич*, президент Союза строителей (работодателей) Тюменской области

*Скоробогатова Юлия Леонидовна*, генеральный директор Союза «Саморегулируемая организация проектировщиков «Западная Сибирь»

*Табанакоев Андрей Владимирович*, председатель Тюменского отделения Союза архитекторов России

*Фролов Александр Витальевич*, директор ГАУ ТО «Управление государственной экспертизы проектной документации»

### Редакция

Маслова Евгения Анатольевна – редактор  
Вахрушева Наталья Викторовна – редактор  
Николюк Светлана Анатольевна – дизайнер

Дата выхода: 12.10.2023  
Цена свободная

### Адрес редакции

625001, Тюмень, ул. Луначарского, 2, к. 117  
Тюменский индустриальный университет  
Телефон (3452) 28-37-50, e-mail: ast@tyuiu.ru

Отпечатано в ООО «Типография ВиК»  
625056, Тюмень, ул. Счастливая, 21, телефон: (3452) 38-86-88

### Адрес издателя

625000, Тюмень, ул. Володарского, 38  
Тюменский индустриальный университет  
Телефон (3452) 28-35-91

## Journal Founders

FSBEI HE "Industrial University of Tyumen" (publisher)  
General Administration of Construction of the Tyumen region

### Editorial Board

**Tatyana V. Maltseva**, D. Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen – **editor-in-chief**

**Abdumanap A. Abduramanov**, D. Sc. in Engineering, Professor, M. Kh. Dulaty Taraz Regional University, Taraz (Republic of Kazakhstan)

**Orif Kh. Amirzoda**, D. Sc. in Engineering, Associate Professor, Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe (Republic of Tajikistan)

**Kaldybay K. Arynov**, D. Sc. in Architecture, Professor, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana (Republic of Kazakhstan)

**Asen Ts. Asenov**, PhD, Associate Professor, "Angel Kanchev" University of Ruse, Ruse (Bulgaria)

**Vladimir G. Barsukov**, D. Sc. in Engineering, Associate Professor, Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno (Republic of Belarus)

**Leonid A. Bartolomey**, D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen

**Anatoliy V. Borodinecs**, D. Sc. in Engineering, Professor, Riga Technical University, Riga (Latvia)

**Nikolay I. Vatin**, D. Sc. in Engineering, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg

**Zoran Grdić**, D. Sc. in Engineering, Professor, University of Niš, Niš (Serbia)

**Nikolay S. Zakharov**, D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen

**Ilya M. Kovenskiy**, D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen

**Sergey A. Kudryavtsev**, D. Sc. in Engineering, Professor, Corresponding Member of RAACS, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

**Zaruhi G. Mamyán**, C. Sc. in Architecture, Professor, National University of Architecture and Construction of Armenia, Yerevan (Republic of Armenia)

**Viktor V. Mironov**, D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen

**Ignacio Menendez Pidal**, PhD, Professor, Madrid Polytechnic University, Madrid (Spain)

**Shakhuba M. Merdanov**, D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen

**Gunasekaran Murali**, PhD, SASTRA Deemed to be University, Thanjavur (India)

**Evgeniy V. Ovchinnikov**, D. Sc. in Engineering, Professor, Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno (Republic of Belarus)

**Igor G. Ovchinnikov**, D. Sc. in Engineering, Professor, Full Member of the Academy of Transport of Russian Federation, Perm National Research Polytechnic University, Perm

**Alexander V. Panfilov**, C. Sc. in Architecture, Associate Professor, Department of Construction, Architecture and Land Relations of the Administration of Salekhard, Salekhard

**Nikolay N. Popok**, D. Sc. in Engineering, Professor, Euphrosyne Polotskaya State University of Novopolotsk, Polotsk (Republic of Belarus)

**Marlena Rajchik**, D. Sc. in Engineering, Professor, Czestochowa University of Technology, Czestochowa (Poland)

**Mehran Sepehri**, PhD, Associate Professor, Sharif University of Technology, Tehran (Iran)

**Alexander V. Sladkovski**, D. Sc. in Engineering, Professor, Silesian University of Technology, Katowice (Poland)

**Vladimir G. Sokolov**, D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen

**Dilshoda N. Sultanova**, D. Sc. in Architecture, Professor, Samarkand State Architectural and Civil Engineering Institute, Samarkand (Republic of Uzbekistan)

**Alexander A. Tarasenko**, D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen

**Vera M. Ulyasheva**, D. Sc. in Engineering, Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg

**Roman S. Fediuk**, D. Sc. in Engineering, Associate Professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok

**Chengzhi Qi**, D. Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing (China)

**Mikhail N. Chekardovski**, D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen

**Zhao Wen**, PhD, Professor, Northeastern University, Shenyang (China)

### Editorial Council

**Alexander V. Nabokov**, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, Director of the Construction Institute, Industrial University of Tyumen – **Chairman**

**Pavel A. Perevalov**, Head of the General Administration of Construction of the Tyumen region

**Zoya G. Arbutova**, Deputy General Director of SRO Soyuz «Organizatsiya izyskateley Zapadnosibirskogo regiona»

**Elena S. Kataeva**, Director of the Union «Samoreguliruemaya organizatsiya stroiteley Tyumenskoy oblasti»

**Andrey Yu. Nikitin**, President of the Soyuz stroiteley (rabotodateley) Tyumenskoy oblasti

**Yulia L. Skorobogatova**, General Director of the Union «Samoreguliruemaya organizatsiya proektirovshchikov «Zapadnaya Sibir'»

**Andrey V. Tabanakov**, Chairman of the Tyumen Branch of the Union of Architects of Russia

**Alexander V. Frolov**, Director of the state autonomous institution of the Tyumen region "Upravlenie gosudarstvennoy ekspertizy proektnoy dokumentatsii"

### Edition

Evgenia A. Maslova – editor

Natalia V. Vakhrusheva – editor

Svetlana A. Nikolyuk – designer

### Editorial office

625001, Tyumen, 2 Lunacharskogo St., office 117

Industrial University of Tyumen

Phone (3452) 28-37-50, e-mail: ast@tyuiu.ru

### Publisher address

625000, Tyumen, 38 Volodarskogo St.

Industrial University of Tyumen

Phone (3452) 28-35-91

# Содержание

## Архитектура

**А. И. Клименко, В. В. Югай**

Городское Николаевское училище в г. Тюмени. Материалы исследования ..... 6

**С. А. Чикалова, Р. Е. Тлустый**

Концепция формирования предметно-пространственной среды  
прибрежной зоны на полуострове Песчаном Владивостокского городского округа ..... 17

## Строительство

**М. Ю. Трошин, А. В. Турков**

Влияние шага досок в поперечном слое на деформативность и распределение напряжений  
в трехслойной CLT-панели, смоделированной как составная пластина ..... 25

**Л. А. Бартоломей, О. А. Богомолова, Л. В. Гейдт, А. В. Гейдт**

Расчет осадок протяженного плитного фундамента конечной жесткости  
на основе данных компьютерного моделирования ..... 33

**И. О. Разов, В. Г. Соколов, А. В. Дмитриев, А. В. Березнев**

Параметрические колебания подземного и надземного нефтепровода ..... 48

**А. Г. Жулин, О. В. Сидоренко, Л. В. Белова**

Технологические схемы обезжелезивания подземных вод Тюменского региона ..... 61

## Транспорт

**В. В. Морозов**

Повышение эффективности организации дорожного движения  
методом отнесенного левого поворота ..... 72

**Р. В. Андронов, Е. Э. Левренц**

Моделирование адаптивного режима работы регулируемого пересечения в составе  
магистральной АСУДД ..... 81

## Машиностроение

**Д. Е. Писарев, С. И. Митрохин**

Расчет скорости воздушного потока из турбины с интегрированным соплом Лавалья  
на выходе для нанесения металлического покрытия методом холодного напыления ..... 89

**И. Г. Жихарева, В. В. Шмидт, Д. В. Денисенко, В. П. Щипанов, А. Д. Федоров, А. И. Неустроев**

О механизмах образования наноструктурных электролитических покрытий  
Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr с функциональными свойствами ..... 96

## Информация для авторов

Правила подготовки рукописи (на русском языке) ..... 104

Правила подготовки рукописи (на английском языке) ..... 106

## Люди, события, факты

Победители XXII конкурса

«На лучшее достижение в строительной отрасли Тюменской области за 2022 год» ..... 108

# Contents

## Architecture

**A. I. Klimenko, V. V. Yugai**

Nikolaevskoe city school in Tyumen. Research materials ..... 6

**S. A. Chikalova, R. E. Tlusty**

Concept of object-spatial environment of the coastal zone of the Peschaniy Peninsula  
in Vladivostok urban district ..... 17

## Construction

**M. Yu. Troshin, A. V. Turkov**

The effect of the lamella pitch in the transverse layer on the deformability  
and stress distribution in a three-layer CLT panel modeled as a composite plate ..... 25

**L. A. Bartolomey, O. A. Bogomolova, L. V. Geidt, A. V. Geidt**

Calculation of settlement of an extended slab foundation of finite stiffness based  
on computer modelling data ..... 33

**I. O. Razov, V. G. Sokolov, A. V. Dmitriev, A. V. Bereznev**

Parametric fluctuations of underground and elevated oil pipeline ..... 48

**A. G. Zhulin, O. V. Sidorenko, L. V. Belova**

Technological schemes for deferrization of groundwater in the Tyumen region ..... 61

## Transport

**V. V. Morozov**

Improving the efficiency of traffic organization by the method of the offset left turn ..... 72

**R. V. Andronov, E. E. Leverents**

Modeling of an adaptive operation mode traffic light intersection  
in a main Automated traffic control system ..... 81

## Mechanical engineering

**D. E. Pisarev, S. I. Mitrokhin**

Calculation of airflow speed from a turbine with an integrated Laval nozzle  
at the outlet for metal coating by cold spraying method ..... 89

**I. G. Zhikhareva, V. V. Schmidt, D. V. Denisenko, V. P. Shchipanov,**

**A. D. Fedorov, A. I. Neustroev**

Mechanisms of formation of nanostructured electrolytic coatings Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr  
with functional properties ..... 96

## Instructions for authors

Manuscript preparation guidelines (In Russian) ..... 104

Manuscript preparation guidelines (In English) ..... 106

## People, Events, Facts

Winners of the XXII contest

"For the best achievement in the construction industry of the Tyumen region in 2022" ..... 108

УДК 728.03(571.12)

2.1.11 Теория и история архитектуры, реставрация  
и реконструкция историко-архитектурного наследия  
(архитектура, технические науки)

# ГОРОДСКОЕ НИКОЛАЕВСКОЕ УЧИЛИЩЕ В г. ТЮМЕНИ. МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

А. И. Клименко, В. В. Югай  
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

## NIKOLAEVSKOE CITY SCHOOL IN TYUMEN. RESEARCH MATERIALS

Aleksandr I. Klimenko, Victoria V. Yugai  
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Аннотация.** Статья посвящена изучению здания бывшего городского Николаевского училища в г. Тюмени. На основании проведенного комплексного научного исследования, включающего историко-архивные и библиографические источники, а также материалы натурных исследований, Институтом проектирования, реконструкции и реставрации объектов городской среды ООО «Тюменьпроект» под руководством Александра Ивановича Клименко была выполнена максимально достоверная графическая реконструкция объекта. Материалы исследования могут стать основанием для дальнейшей работы над объектом, в том числе для выполнения проекта реставрации и приспособления его к современным условиям жизни города.

**Ключевые слова:** архитектура Тюмени, городское училище, деревянные дома общественного назначения, деревянная архитектура, неоклассицизм, учебные и образовательные заведения

**Abstract.** The article is devoted to the study of the building of former Nikolaevskoe city school in Tyumen. The Institute of Design, Reconstruction and Restoration of Urban Environment Objects of LLC "Tyumenproekt" under the direction of Alexander I. Klimenko carried out a comprehensive scientific study, including historical and archival and bibliographic sources, as well as materials of field research, and made the most reliable graphic reconstruction of the object. The materials of the study may become the basis for further work, including the restoration project of building and its adaptation to the modern conditions of city life.

**Key words:** Tyumen architecture, city school, wooden public buildings, wooden architecture, neoclassicism, educational institutions



**Для цитирования:** Клименко, А. И. Городское Николаевское училище в г. Тюмени. Материалы исследования / А. И. Клименко, В. В. Югай. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-6-16. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 3 (105). – С. 6–16.

**For citation:** Klimenko, A. I., & Yugai, V. V. (2023). Nikolaevskoe city school in Tyumen. Research materials. Architecture, Construction, Transport, (3(105)), pp. 6-16. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-6-16.

## Введение

Во второй половине XVIII в. в архитектуре центральной части России на смену пышному барокко пришло строгое, рациональное искусство классицизма, которое уже к концу XVIII – началу XIX вв. нашло свое отражение в застройке городов Западной Сибири. Классицизм в большей степени отразился на объектах нового типа общественного назначения: административных, просветительских, учебных заведениях, учреждениях здравоохранения [1].

Градостроительная реформа Екатерины II, направленная на применение регулярной системы планировки в застройке городов, повлекла за собой распространение по всей стране «образцовых проектов» жилых и общественных зданий. Многие сибирские города, имеющие на тот момент характерную «живописную» пространственную организацию и свободную планировочную структуру, претерпели значительные изменения, что отразилось и в архитектурном облике.

С развитием железнодорожного сообщения и включением его в общую систему Транссибирской железнодорожной магистрали Тюмень получила импульс развития, стала своего рода перевалочным пунктом на ключевых торговых направлениях. Конец XIX – начало XX вв. поистине можно считать расцветом городского строительства.

В Сибирском регионе дворянского сословия почти не было, в связи с чем ведущие позиции в городском руководстве, развитии торговли и промышленности, благоустройстве и градостроительстве города занимали купцы. Местное купечество оказало значительное влияние на формирование застройки центральной части города: купцы выступали в качестве основных заказчиков как объектов городского значения

(общественных зданий различной типологии – образовательных учреждений, учреждений здравоохранения и др.), так и объектов, предназначенных для личного пользования (жилых усадеб, торговых лавок, складов) [2].

Классицизм получил распространение в среде высшей городской интеллигенции, в особенности купечества, как отражение особого социального статуса владельцев, их значимости. В тот период этот стиль как в общественных объектах, так и в жилой застройке максимально полно отражал запросы главного заказчика [3]. Сегодня данные здания являются объектами историко-культурного наследия и играют значимую роль в формировании архитектурного облика города, что подчеркивает необходимость включения их в современную жизнь городской среды.

## Объект и методы исследования

Объектом исследования является городское Николаевское училище в г. Тюмени. В процессе исследования применялись следующие методы: анализ и синтез, классификация, сравнение.

## Результаты и обсуждение

Здания, строившиеся в Тюмени в конце XIX – начале XX вв. специально для начальных и средних учебных заведений, были преимущественно кирпичными, к ним относятся реальное училище (Республики, 7), коммерческое училище Колокольниковых (Луначарского, 2), частная школа Колокольниковых (Луначарского, 14), ремесленное училище Текутьева (Дзержинского, 7 / Осипенко, 1), Романовское училище (Даудельная, 1г), ремесленное училище при сиропитательном заведении (Республики, 60), Спасская церковно-приходская школа (Ленина, 41), уездное училище (Семакова, 10), женская школа и женская гимна-

зия (Володарского, 6) и др. Деревянные дома, в которых размещались некоторые из начальных учебных заведений, как правило, были приспособлены для новой функции.

При строительстве учебных заведений, можно предположить, использовали типовые проекты, однако их адаптировали к местным условиям, пожеланиям и потребностям заказчика. В 1899 г. была выпущена в свет книга «Положение церковного и школьного строительства в районе Сибирской железной дороги на средства фонда имени императора Александра III» [4]. Содержащийся в ней альбом чертежей не мог быть использован при проектировании Николаевского училища в

Тюмени, поскольку был выпущен через два года после возведения объекта. Несмотря на возможные истоки планировки здания училища в типовых проектах, это редкий представитель деревянной постройки классицистического стиля, не имеющий в Тюмени аналогов. Меандровый орнамент, опоясывающий дом, использовался в тюменской архитектуре еще только единожды – на каменном доме Чмутиной на ул. Водопроводной, 2. Декоративное решение фасадов здания было predetermined функциональным – академическим – назначением постройки.

Строительство в Тюмени здания для нового учебного заведения не было случайным, оно



a)



b)



Рис. 1. Николаевское городское училище: а) вид Тюмени конца XIX – начала XX вв. с объектом на дальнем плане; б) вид на объект в середине XX в.; в) современный вид (фото из архива А. И. Клименко)

Fig. 1. Nikolaevskoe city school: a) view of Tyumen at the end of the 19<sup>th</sup> – beginning of the 20<sup>th</sup> centuries with the building of school in the background; b) view of the building in the middle of the 20<sup>th</sup> century; c) modern view (photo from the archive of A. I. Klimenko)

вписывалось в государственную политику по увеличению количества начальных школ в стране в целом.

Одноэтажное деревянное здание на кирпичном цоколе, расположенное на углу Трусовского переулка и ул. Спасской (в настоящее время ул. Перекопская, 4 / Ленина, 5), было построено в конце XIX в. По материалам Первой Всероссийской переписи населения 1897 г., в этот период строительство еще велось. Предназначалось отвести «вновь строящийся» дом под Николаевское двухклассное городское училище (рис. 1).

Дату завершения его строительства установить не удалось. Практика того времени показывала, что обычно такого рода объекты возводились за два сезона, следовательно, по мнению известного тюменского историка-краеведа В. А. Чупина, учебное заведение могло быть открыто в 1898–1899 гг., а по данным искусствоведа Е. М. Козловой-Афанасьевой, учреждение учебного заведения датируется 1896 г. [5].

В Николаевском мужском народном приходском училище действовало «три комплекта учащихся и учащихся», то есть работало три учителя и училось около 150 учеников, по 50 в каждом классе. При училище имелась квартира для одного из учителей [6]. В 1912 г. законоучителем в училище служил священник Иаков Васильевич

Лапин, а учителями – Миловская Клавдия Ивановна, Панин Иван Антонович и Воронцева М. Ивановна.

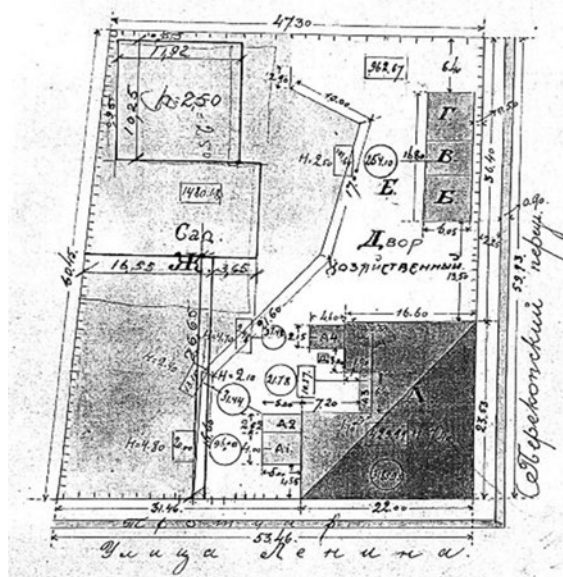
#### Градостроительное положение объекта

В конце XIX – начале XX вв. Николаевское училище находилось на окраине обширной Гостинодворной площади и имело адрес: Гостинодворная площадь, 7. Перекресток современных улиц Перекопской и Ленина служил тогда началом соответственно Трусовского переулка и Спасской улицы.

Прежде Николаевскому училищу принадлежала довольно обширная территория, на которой размещались сад и хозяйственный двор с постройкой (рис. 2). В настоящее время на большей части территории с северной стороны располагается пятиэтажный жилой дом с придомовой территорией.

#### Объемно-планировочная структура и архитектурно-художественная композиция

Николаевское приходское училище обладало простой, но выразительной объемно-планировочной структурой, представленной крупным г-образным объемом в два этажа с двумя пристроями со двора. В настоящее время один из дворовых объемов утрачен, а второй дополнен входной группой с западной (дворовой) части здания. Таким образом, объемно-планировоч-



#### Экспликация к ген. плану

№ п/п	КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ СТРОЕНИЙ И ЗЕМЕЛЬНЫХ УГОДий	ПЛОЩАДЬ КВ. МТР.	
		Застроен.	Зем. угодий
1	Дом многоквартирный 2-х этажный	429.99	
2	Кухня в тесовое	20.00	
3	Стол в тесовое	13.10	
4	Стол в тесовое	10.37	
5	Стол в тесовое	9.89	
6	Сад из плитки	37.57	
7	Кладовые под тесовой крышей	25.41	
8	Жилая в тесовом	38.72	
9	Двор	4.03	
10	Двор хозяйственный		962.67
11	Сад		1480.68
	Итого:	589.02	2143.35

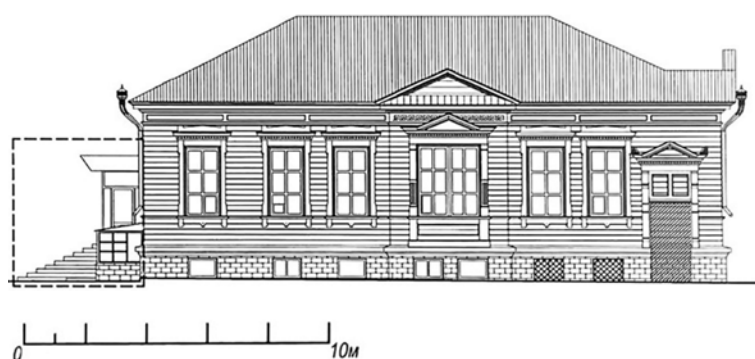
Рис. 2. План усадьбы 1928 г. Архив ТФ ФГУП «Ростехинвентаризация»

Fig. 2. Plan of the manor in 1928. Archive of the Tyumen branch of FSUE "Rostekhinventarizatsiya"

ная структура памятника претерпела значительные изменения, утратив при этом и первоначальные дворовые фасады. Наиболее полное представление об архитектурных достоинствах здания демонстрируют достаточно сохранившиеся уличные фасады. Оба фасада обладают четко выраженной осью симметрии, но их композиционное построение различно. Центр композиции юго-западного фасада по ул. Ленина выделен ризалитом с крупномасштабным окном и треугольным фронтоном в завершении. Полная симметрия нарушена выразительным оформлением ранее существовавшего парадного входа в виде массивного деревянного козырька с треугольным фронтоном, опирающегося на объемные кронштейны. В настоящее время парадный вход заложен и не используется (рис. 3).

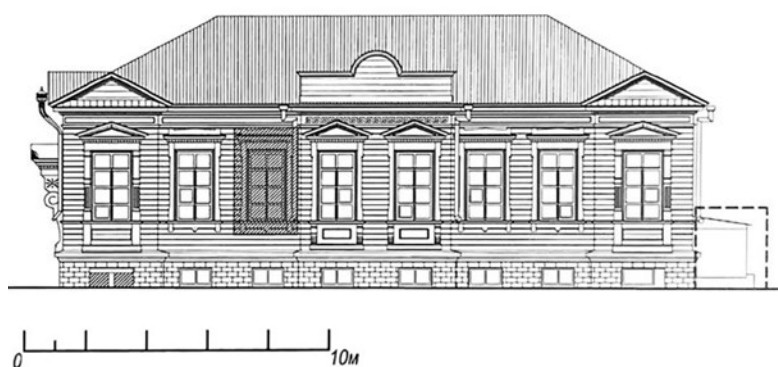
Юго-восточный фасад по ул. Перекопской имеет более сложную симметричную, трехчастную композицию. Трехчастность построения фасада отмечена центральным и двумя боковыми ризалитами, акцентированными завершениями в виде треугольных фронтонов на боковых и более сложным аттиком на центральном [7]. Композиционная значимость ризалитов подчеркнута более сложными наличниками высоких окон с треугольными фронтонами, по одному в боковых и двумя окнами в центральном (рис. 4).

Представляет интерес построение фасадов каменно-деревянного здания по вертикали. Нижний невысокий каменный цокольный этаж помимо простого межэтажного карниза лишен архитектурных деталей. Плоскость стены прорезана небольшими квадратными окнами, причем окна в ризали-



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	
	ПОЗДНИЕ ПРИСТРОИ
	ЗАЛОЖЕННЫЕ ПРОЕМЫ
	ВНОВЬ ПРОБИТЫЕ ПРОЕМЫ

Рис. 3. Юго-западный фасад (по ул. Ленина). Обмеры выполнены Институтом проектирования, реконструкции и реставрации объектов городской среды ООО «Тюменьпроект» (2007 г.)  
 Fig. 3. Southwestern facade (along Lenina St.). Measurements made by the Institute of Design, Reconstruction and Restoration of Urban Environment Objects of LLC "Tyumenproekt" (2007)



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	
	ПОЗДНИЕ ПРИСТРОИ
	ЗАЛОЖЕННЫЕ ПРОЕМЫ
	ВНОВЬ ПРОБИТЫЕ ПРОЕМЫ

Рис. 4. Юго-восточный фасад (по ул. Перекопской). Обмеры выполнены Институтом проектирования, реконструкции и реставрации объектов городской среды ООО «Тюменьпроект» (2007 г.)  
 Fig. 4. Southeastern facade (along Perekopskaya St.). Measurements made by the Institute of Design, Reconstruction and Restoration of Urban Environment Objects of LLC "Tyumenproekt" (2007)

тах несколько отличаются от рядовых и выполнены в виде двух спаренных в общем проеме. Таким образом, простой, лишенный декора цокольный этаж служит основанием (подиумом) для высокого деревянного, насыщенного архитектурными деталями первого этажа. Архитектурно-художественное решение фасадов деревянного, обшито досками первого этажа выполнено в классицистической манере. Декор фасадов составляют наличники окон, ризалиты с треугольными фронтонами и кронштейнами на подоконных досках и прямым карнизом на рядовых окнах. Профильный венчающий карниз большого выноса поддержан фризом с простыми накладками, в центральных ризалитах фриз украшен накладками в виде меандра. Профильные карнизы наличников и фронтонов декорированы деревянными сухариками [8].

### Планировочная структура

В сравнении с историческими аналогами приходское училище в Тюмени наряду с характерными, общими для данной типологической группы приемами, обладает четко выраженным своеобразием планировочной организации. Особую ценность имеет сохранившийся в архиве «Ростехинвентаризации» план усадьбы и планы этажей объекта за 1928 г. Они фиксируют первоначальную планировку и функциональную организацию здания практически без изменений (рис. 5).

Центральным ядром планировки обеих этажей является широкий коридор – холл, разделяющий здание на две части – учебную и вспомогательную. Коридор освещается крупными окнами по торцам, фиксирующими его расположение на фасадах. С юго-восточной стороны от коридо-

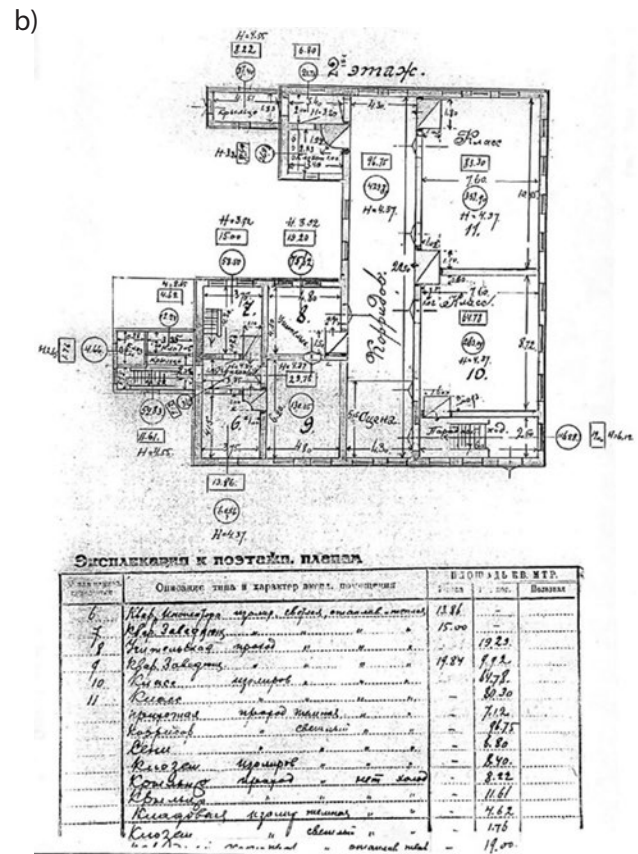
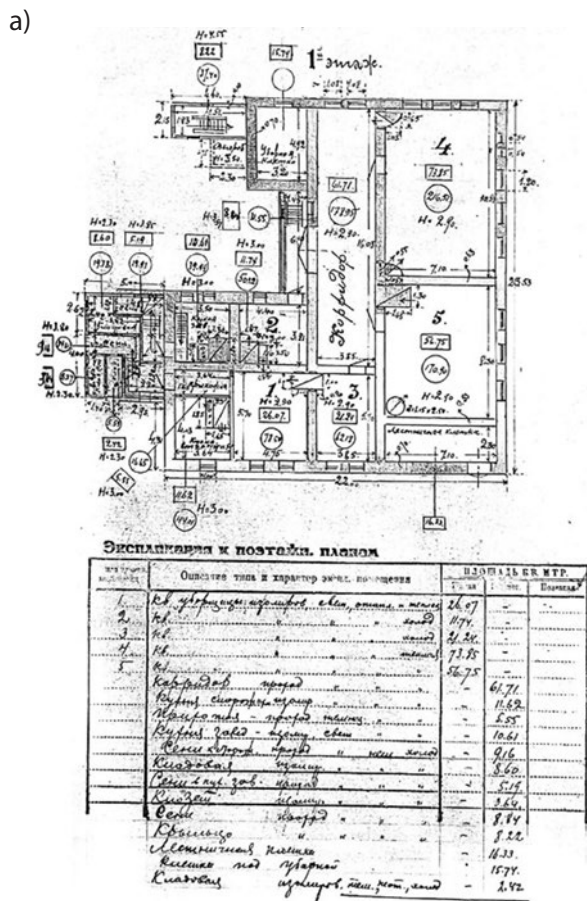


Рис. 5. План усадьбы 1928 г.: а) план цокольного этажа; б) план первого этажа. Архив ТФ ФГУП «Ростехинвентаризация»

Fig. 5. Plan of the manor house in 1928: a) basement floor plan; b) plan of the first floor. Archive of the Tyumen branch of FSUE "Rostekhinventarizatsiya"

ра на цокольном и первом этажах расположены крупные классные комнаты и входной блок с широкой традиционно одномаршевой лестницей. С северо-запада к коридору первого этажа примыкает блок санузлов (клозет) и тамбур со вспомогательным выходом по одномаршевой лестнице во двор, группа из четырех небольших комнат, связанных анфиладно между собой, где располагались учительские и квартира одного из учителей-смотрителей (в советское время заведующего). Квартира располагалась в двух уровнях: на первом этаже жилые комнаты, на цокольном этаже – кухня, а в советское время в этот блок были добавлены квартиры для инспектора и персонала. Блок имел отдельный выход во двор и одномаршевую лестницу, связывающую два этажа. Между двумя дворовыми блоками, примыкая к северо-западному фасаду основного объема, располагалась пониженная терраса, крытая навесом. Под наве-

сом в стене цокольного этажа был устроен широкий, ведущий в коридор цоколя проем – ворота.

В настоящее время первоначальная планировка памятника полностью утрачена и в интерьере здания не прочитывается. Парадная лестница демонтирована, на ее месте устроены новые помещения. В капитальных стенах пробиты новые проемы, прежние заложены. Печи и каминны разобраны. Все помещения разделены многочисленными новыми перегородками. Связь между этажами осуществляется по вновь устроенной внутренней лестнице в коридоре. Декор стен и потолков утрачен (рис. 6).

#### Конструктивные особенности

Конструктивная схема училища традиционна и характерна для застройки Тюмени конца XIX – начала XX вв.: кирпичный цокольный этаж, бревенчатый обшитый досками первый и тесовые дворовые пристрои. Деревянная стропиль-

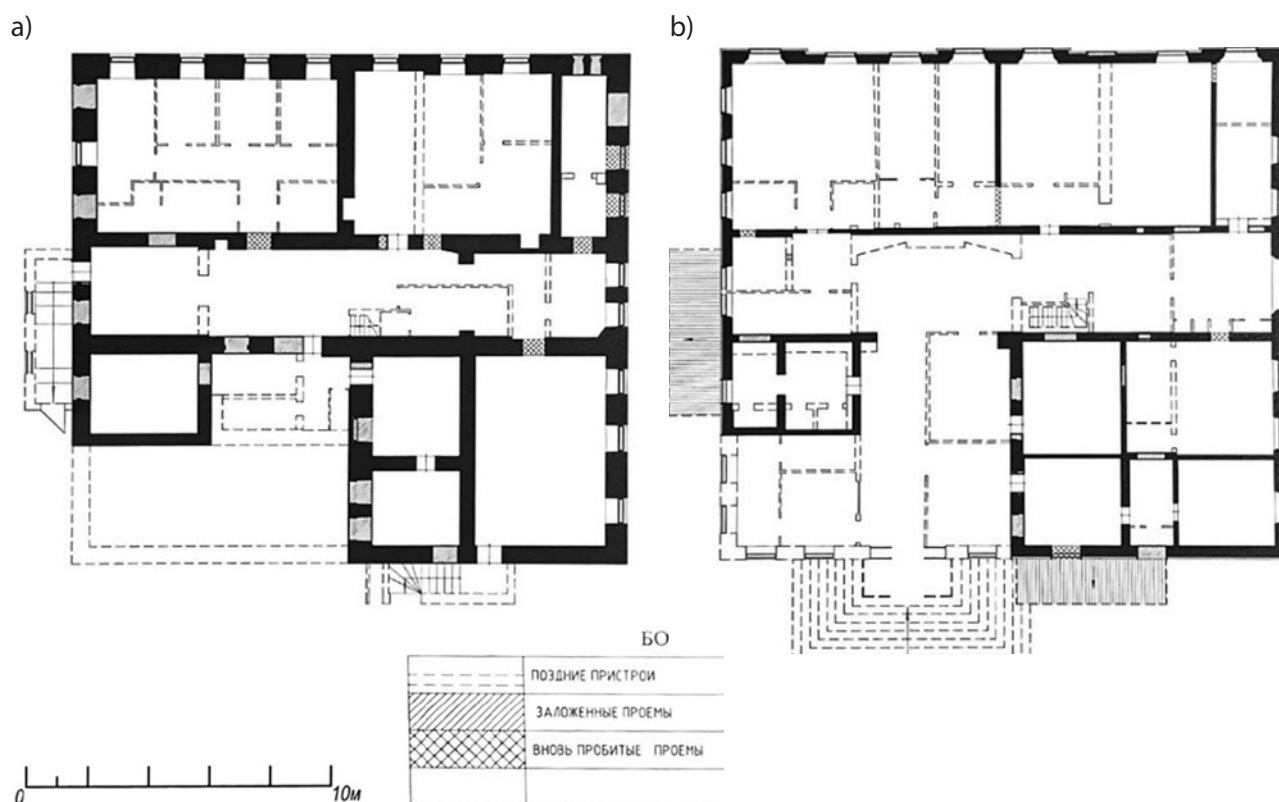


Рис. 6. План усадьбы 2007 г.: а) план цокольного этажа; б) план первого этажа. Обмеры выполнены Институтом проектирования, реконструкции и реставрации объектов городской среды ООО «Тюменьпроект»

Fig. 6. Plan of the manor house in 2007: a) basement floor plan; b) plan of the first floor. Measurements made by the Institute of Design, Reconstruction and Restoration of Urban Environment Objects of LLC "Tyumenproekt"



полнить графическую модель первоначального вида памятника (рис. 8).

Представляется важным отметить нюанс, внесенный автором в модель графической реконструкции памятника, возможный к обсуждению. На плане цокольного этажа на утраченном ныне дворе пристроено четко видна трассировка наружных стен. В процессе строительства

размеры и планировка пристроя были изменены по причине устройства дополнительных вспомогательных помещений – кладовых, сеней и прочих, что прослеживается и на архивных фотографиях возведенного здания. В итоге построенный объем отличался очень сложной планировкой с двумя узкими внутренними лестницами, что, по нашему мнению, значительно нарушило про-

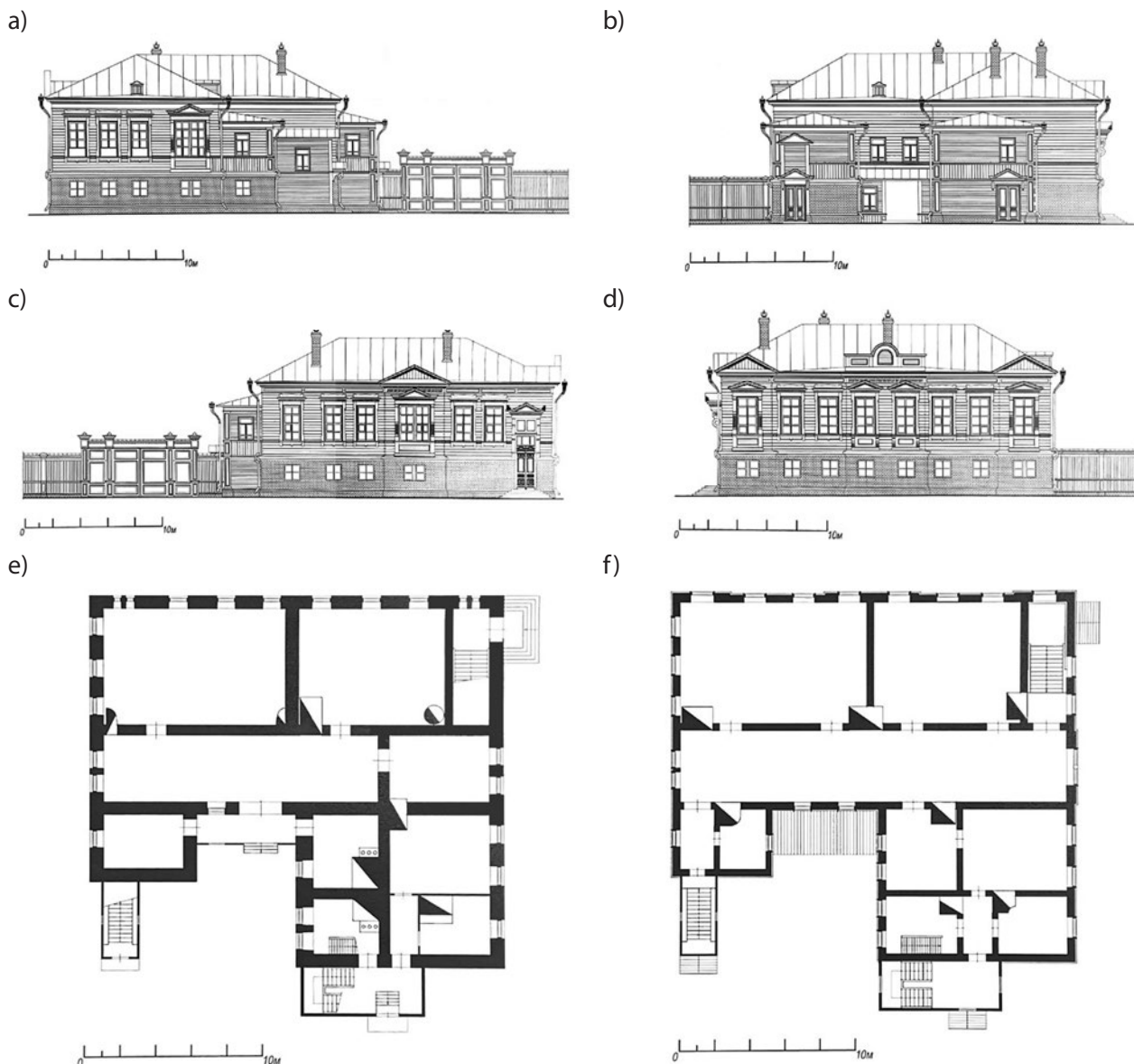


Рис. 8. Графическая реконструкция усадьбы, 2007 г.: а) северо-восточный фасад; б) северо-западный фасад; в) юго-западный фасад; г) юго-восточный фасад; е) план цокольного этажа; ф) план первого этажа. Выполнена Институтом проектирования, реконструкции и реставрации объектов городской среды ООО «Тюменьпроект»  
 Fig. 8. Graphic reconstruction of the manor house, 2007: а) northeastern facade; б) northwestern facade; в) southwestern facade; г) southeastern facade; е) basement floor plan; ф) plan of the first floor. The reconstruction made by the Institute of Design, Reconstruction and Restoration of Urban Environment Objects of LLC "Tyumenprojekt"



стую и ясную планировку здания. В связи с этим, в модель графической реконструкции автором внесено изменение, приближенное к тактичному проектному решению.

### **Выводы**

Проблема сохранения исторической среды и качественной реставрации объектов культурного наследия во многих городах страны приобрела особую актуальность. Сохранение уникаль-

ности и своеобразия застройки города – одна из основных задач, решение которой возможно при внимательном, профессиональном подходе [10].

На сегодняшний день бывшее Николаевское училище не имеет определенной функции и находится в неудовлетворительном состоянии. Поэтому представленная в материалах исследования графическая реконструкция может послужить основой для проекта приспособления и включения объекта в современную жизнь города.

### **Библиографический список**

1. История русского искусства / под общей редакцией И. Э. Грабаря, В. Н. Лазарева и В. С. Кеменова ; Академия наук СССР, Институт истории искусств. – Москва : Издательство Академии наук СССР, 1953–1969. – Текст : непосредственный.  
Т. 6 : Искусство второй половины XVIII века. Архитектура. Скульптура / под редакцией В. Н. Лазарева, Т. В. Алексеевой. – 1961. – 494 с.
2. Гайдук, М. Ю. Модерн и неоклассицизм в архитектуре зданий г. Тюмени, построенных на средства местного купечества во второй половине XIX – начале XX века / М. Ю. Гайдук. – DOI 10.31675/1607-1859-2021-23-6-56-64. – Текст : непосредственный // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2021. – Т. 23, № 6. – С. 56–64.
3. Ситникова, Е. В. Вклад тюменского купечества в формирование культового зодчества г. Тюмени / Е. В. Ситникова, М. Ю. Пухлякова. – Текст : непосредственный // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 3 (56). – С. 70–81.
4. Положение церковного и школьного строительства в районе Сибирской железной дороги на средства фонда имени Императора Александра III к 1 января 1900 года. – Санкт-Петербург : Государственная типография, 1900. – 104 с. – Текст : непосредственный.
5. Козлова-Афанасьева, Е. М. Архитектурное наследие Тюменской области : иллюстрированный научно-практический каталог / Е. М. Козлова-Афанасьева. – Тюмень : Издательство «Искусство», 2008. – 488 с. – Текст : непосредственный.
6. Калугин, Т. Ф. Тюмень. 1913. Справочник и Адрес-календарь по городу и уезду. – Тюмень : Типография А. А. Благинина, 1913. – 194 с. – Текст : непосредственный.
7. Гайдук, М. Ю. Дома с мезонином в жилой застройке городов Тюменской области как объекты историко-культурного наследия (вторая половина XIX – начало XX в.) / М. Ю. Гайдук, А. И. Клименко, О. С. Порошин. – DOI 10.24158/fk.2021.1.14. – Текст : непосредственный // Общество: философия, история, культура. – 2021. – № 1 (81). – С. 83–92.
8. Пухлякова, М. Ю. Деревянная архитектура Тюмени конца XIX – начала XX в. / М. Ю. Пухлякова, Е. В. Ситникова. – Текст : непосредственный // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 32–46.
9. Тилинский, А. И. Руководство для проектирования и постройки зданий. Практические сведения по строительному искусству и 7 отделов чертежей и проектов зданий. – 2-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург : Издательство А. С. Суворина, 1912. – 164 с. – Текст : непосредственный.
10. Клименко, А. И. Дом купца Каменского в г. Ишиме. Материалы исследования / А. И. Клименко, М. Ю. Гайдук. – Текст : непосредственный // Сибирское купечество: истоки, деятельность, наследие: Материалы Четвертой Всероссийской научной конференции, Томск, 17 октября 2020 года. – Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. – С. 164–170.

## References

1. Lazarev, V. N., & Alekseeva, T. V. (eds.). (1961). *Istoriya russkogo iskusstva*. T. 6. *Iskusstvo vtoroy poloviny XVIII veka*. Arkhitektura. Skul'ptura. Moscow, Akademiya nauk SSSR Publ., 494 p. (In Russian).
2. Gaiduk, M. Yu. (2021). Art nouveau and neoclassicism of buildings in Tyumen financed by merchants late in the 19<sup>th</sup> and early 20<sup>th</sup> centuries. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. *Journal of Construction and Architecture*, 23(6), pp. 56-64. (In Russian). DOI 10.31675/1607-1859-2021-23-6-56-64.
3. Sitnikova, E. V., & Pukhlyakova, M. Yu. (2016). Contribution of Tyumen merchants to the formation of church architecture in Tyumen. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. *Journal of Construction and Architecture*, (3(56)), pp. 70-81. (In Russian).
4. Ministerstvo narodnogo prosveshcheniya. (1990). *Polozhenie tserkovnogo i shkol'nogo stroitel'stva v rayone Sibirskoy zheleznoy dorogi na sredstva fonda imeni Imperatora Aleksandra III k 1 yanvarya 1900 goda*. Saint Petersburg, Gosudarstvennaya tipografiya Publ., 1900, 104 p. (In Russian).
5. Kozlova-Afanas'eva, E. M. (2008). *Arkhitekturnoe nasledie Tyumenskoy oblasti*. Tyumen, OOO "Izdatel'stvo Iskusstvo" Publ., 488 p. (In Russian).
6. Kalugin, T. F. (1913). *Tyumen! 1913. Spravochnik i Adres-kalendar' po gorodu i uezdu*. Tyumen', Tipografiya A. A. Blaginina Publ., 194 p. (In Russian).
7. Gaiduk, M. Yu., Klimenko, A. I., & Poroshin, O. S. (2021). Houses with mezzanine in residential development of cities of the Tyumen region as objects of historical and cultural heritage (second half of XIX – early XX centuries). *Society: Philosophy, History, Culture*, (1(81)), pp. 83-92. (In Russian). DOI 10.24158/fik.2021.1.14.
8. Pukhlyakova, M. Yu., & Sitnikova, E. V. (2018). Wooden architecture of Tyumen late in the 19<sup>th</sup> and early 20<sup>th</sup> centuries. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. *Journal of Construction and Architecture*, 20(1), pp. 32-46. (In Russian).
9. Tilinskiy, A. I. (1912). *Rukovodstvo dlya proektirovaniya i postroyki zdaniy*. *Prakticheskie svedeniya po stroitel'nomu iskusstvu i 7 otdelov chertezhey i projektov zdaniy*. 2<sup>nd</sup> edition, revised. Saint Petersburg, A. S. Suvorin Publ., 164 p. (In Russian).
10. Klimenko, A. I., & Gayduk, M. Yu. (2020). *Dom kuptsa Kamenskogo v g. Ishime. Materialy issledovaniya*. *Sibirskoe kupechestvo: istoki, deyatel'nost', nasledie: Materialy Chetvertoy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii*, October, 17. Tomsk, Tomsk State University of Architecture and Building Publ., pp. 164-170. (In Russian).

### Сведения об авторах

Клименко Александр Иванович, доцент, заведующий кафедрой дизайна архитектурной среды, Тюменский индустриальный университет, e-mail: archklim@mail.ru

Югай Виктория Викторовна, ассистент-стажер кафедры дизайна архитектурной среды, Тюменский индустриальный университет, e-mail: jugajvv@tyuiu.ru

### Information about the authors

Aleksandr I. Klimenko, Associate Professor, Head at the Department of Architectural Environment Design, Industrial University of Tyumen, e-mail: archklim@mail.ru

Victoria V. Yugai, Intern-Assistant at the Department of Architectural Environment Design, Industrial University of Tyumen, e-mail: jugajvv@tyuiu.ru

*Получена 29 мая 2023 г., одобрена 8 августа 2023 г., принята к публикации 28 сентября 2023 г.  
Received 29 May 2023, Approved 8 August 2023, Accepted for publication 28 September 2023*

# КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРЕДМЕТНО-ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СРЕДЫ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ НА ПОЛУОСТРОВЕ ПЕСЧАНОМ ВЛАДИВОСТОКСКОГО ГОРОДСКОГО ОКРУГА

С. А. Чикалова, Р. Е. Тлустый  
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

## CONCEPT OF OBJECT-SPATIAL ENVIRONMENT OF THE COASTAL ZONE OF THE PESCHANIY PENINSULA IN VLADIVOSTOK URBAN DISTRICT

Svetlana A. Chikalova, Ruslan E. Tlusty  
Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

**Аннотация.** Представлена концепция формирования предметно-пространственной среды прибрежной территории и водных подходов полуострова Песчаного, находящегося в границах Владивостокского городского округа. Предпроектный анализ, включающий, в частности, фотофиксацию современного состояния территории, определение ее недостатков, проведение социального опроса, показал, что она не соответствует современным требованиям по комфорту и транспортной доступности, имеет эстетически непривлекательный вид. Реализация проектных предложений позволит повысить качество городской среды и решит сразу несколько проблем благоустройства. Формирование комфортной городской среды, улучшение транспортной доступности островных и прибрежных территорий, а также развитие туристско-рекреационной инфраструктуры необходимо для социально-экономического развития Владивостока как столицы Дальнего Востока.

**Abstract.** The paper presents the concept of the object-spatial environment of the coastal territory and water approaches of the Peschaniy Peninsula, located within the boundaries of Vladivostok urban district. Pre-project analysis, including photo-fixation of the current state of the territory, identification of its shortcomings and conducting a social survey, showed that it did not meet modern requirements for comfort and transport accessibility, had an aesthetically unattractive appearance. The main goal of the article was to suggest the project that would increase the quality of the urban environment and solve several problems of site improvement at once. Creating a comfortable urban environment, improving transportation accessibility of island and coastal territories, and developing tourist and recreational infrastructure are necessary for social and economic development of Vladivostok as the capital of the Far East.

**Ключевые слова:** морские маршруты, комфортная среда, прибрежная инфраструктура

**Key words:** sea routes, comfortable environment, coastal infrastructure

**Для цитирования:** Чикалова, С. А. Концепция формирования предметно-пространственной среды прибрежной зоны на полуострове Песчаном Владивостокского городского округа / С. А. Чикалова, Р. Е. Тлустый. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-17-24. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 3 (105). – С. 17–24.

**For citation:** Chikalova, S. A., & Tlusty, R. E. (2023). Concept of object-spatial environment of the coastal zone of the Peschaniy Peninsula in Vladivostok urban district. Architecture, Construction, Transport, (3(105)), pp. 17-24. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-17-24.

### Введение

В последние годы в России начал активно развиваться внутренний туризм. В связи с введенными санкциями и ограничениями, закрытием границ и другими сложностями отдыха за рубежом отечественные курортные, рекреационные и исторические зоны стали пользоваться большей популярностью.

В декабре 2021 г. Правительство Российской Федерации приняло национальный проект по развитию туризма. В числе приоритетных и уже реализуемых задач Приморского края – развитие транспортной инфраструктуры, повышение ее доступности, формирование комфортной среды для жизни и развитие туристского кластера «Приморье»<sup>1</sup>.

Приморье – самый дальний уголок юго-востока России. В крае сосредоточены уникальные природные богатства флоры и фауны – джунгли с редчайшими и даже исчезнувшими в других частях планеты растениями и животными. Ландшафт представляет собой сочетание высокогорий и низин, озер, стремительных рек и морских пляжей, водопадов и потухших вулканов, метеоритных кратеров и карстовых пещер. Настоящее достояние и гордость Приморья – красивейшие первозданные острова с бесчисленными мор-

скими бухтами, нетронутыми цивилизацией. Уже сейчас жителям и гостям города можно предложить достаточное количество водных маршрутов и направлений для организации отдыха. Именно по этой причине в Приморье быстро развивается экологический туризм.

Водный транспорт – один из старейших и востребованных местным населением, а морские пассажирские маршруты всегда пользовались спросом. Одним из мест притяжения является полуостров Песчаный (рис. 1). Добраться до него можно на автомобиле (126 км) или воспользовавшись услугами частного водного транспорта или рейсового катера (15 км), который осуществляет поездки на регулярной основе с мая по ноябрь (г. Владивосток – п-в Песчаный – г. Владивосток) [1].

Благодаря близости к городу полуостров Песчаный идеально подходит как для кратковременного, так и для более продолжительного отдыха.

В настоящее время условия ожидания водного транспорта на полуострове не соответствуют современным требованиям и нормам: пассажиры не защищены от таких погодных явлений, как сильный ветер, морось, дождь, палящее солнце (рис. 2, 3).

<sup>1</sup> Об утверждении Национальной программы социально-экономического развития Дальнего Востока на период до 2024 г. : Распоряжение Правительства РФ от 24 сентября 2020 г. № 2464-р. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/565853199/> (дата обращения: 20.05.2023).



Рис. 1. Водный маршрут  
г. Владивосток – полуостров Песчаный [2]  
Fig. 1. Water route Vladivostok – Peschany Peninsula [2]



Рис. 2. Современное состояние пирса,  
предназначенного для обслуживания морских  
пассажирских перевозок, ноябрь 2022 г.  
Fig. 2. Current condition of the pier designed to serve  
marine passenger transportation, November 2022



Рис. 3. Современное состояние береговой  
инфраструктуры полуострова Песчаного,  
ноябрь 2022 г.  
Fig. 3. Current state of coastal infrastructure of the  
Peschaniy Peninsula, November 2022

Рассмотренная территория полуострова Песчаного Владивостокского городского округа не отвечает современным требованиям, характеризуется низким уровнем комфорта, неразвитой сетью обслуживания, неэффективным использованием территории. В связи с этим формирование предметно-пространственной среды прибрежной зоны является актуальной задачей.

### Предмет и методы исследования

Предметом исследования является прибрежная территория полуострова Песчаного. Он находится на западном берегу Амурского залива в 12 км от г. Владивостока и входит во Владивостокский городской округ [3]. С юга полуострова располагается бухта Мелководная, с севера бухта Песчаная, с востока Амурский залив. Берега песчаные, без скалистых мысов и утесов.

В работе применены такие методы исследования, как изучение литературных источников и материалов из сети интернет, наблюдение, фотофиксация, анализ современного состояния, социологический опрос, моделирование, обобщение.

### Результаты

На первом этапе исследования была поставлена задача выявить потребности потенциальных пользователей, чтобы подобрать наиболее эффективные и востребованные решения для разработки концепции проекта и, как следствие, создания оптимальной комфортной среды в прибрежной зоне.

В ходе исследования был проведен опрос среди городского населения. Вопросы для анкетирования были максимально просты, составлены без использования профессиональной терминологии и адаптированы для разных возрастных групп [4, 5]. Опрос проводился в электронном виде по интернету. В нем приняли участие 85 человек разных возрастных категорий: 35.5 % респондентов были в возрасте 30–45 лет, 28.2 % – 16–30 лет, 17.6 % – 45–60 лет, респондентов в возрасте 60 лет и более было 15.3 %, число опрошенных моложе 16 лет составило 3.4 %.

Согласно опросу, абсолютное большинство респондентов – 92.9 % – считает, что в Примор-

ском крае нужно развивать морской общественный транспорт, 7.1 % затруднились с ответом. Развитие на прибрежной территории объектов обслуживания граждан считают необходимым 96.5 % проголосовавших.

На вопрос о приоритетных направлениях развития морского транспорта 12.9 % респондентов ответили, что важно развивать инфраструктуру, 8.2 % высказались за расширение географии перевозок, 4.8 % – за повышение их уровня безопасности. Большинство участников опроса – 74.1 % – уверены, что необходимо комплексно подходить к данному вопросу, и отметили все предложенные варианты ответа.

Таким образом, опрос респондентов показал высокий уровень заинтересованности жителей в развитии морского транспорта и соответствующей инфраструктуры.

Морские маршруты предоставляют возможность не только посещать различные города и туристические объекты, расположенные вдоль побережья, но и наслаждаться природой во время путешествий. Однако для успешной организации и реализации пассажирских и туристических морских маршрутов необходимо иметь хорошо организованную инфраструктуру, включающую зону пешеходной доступности и водных подходов, а также общественную зону [6]. Кроме того, важно предусмотреть зонирование территории для наземного транспорта и озеленение.

При проектировании объектов прибрежной транспортной инфраструктуры на полуострове Песчаном необходимо учитывать особенности климатических условий, географическое положение, рельеф местности, поэтому в ходе предпроектной работы важным было провести анализ, включающий исследование формы прибрежной территории, конфигурации рельефа, особенностей природной и социальной среды, диагностику проблем и установление целевых параметров.

Одним из критериев выбора места для проектирования объектов на полуострове Песчаном была его близость к Владивостоку и наличие удобных морских подходов путей (рис. 4).

При разработке концепции проекта прибрежной территории и водных подходов полуострова



Рис. 4. Участок на полуострове Песчаном, выбранный для проекта [2]

Fig. 4. The territory in Peschanoy Peninsula selected for the project [2]

Песчаного одной из главных задач было вписать новые объекты в окружающую среду таким образом, чтобы они не нарушали и не портили ее уникальность и естественную красоту (рис. 5) [7–9].

Малоэтажная застройка для проекта выбрана прежде всего с той целью, чтобы не загромождать прибрежную зону высокими зданиями. Такая застройка создает уютную и комфортную атмосферу, а круглые и полукруглые формы в инфраструктуре гармонично вписываются в окружающую природную среду и обладают рядом достоинств: обеспечивают оптимальное использование пространства, повышают устойчивость конструкций к агрессивным воздействиям природных явлений, снижают риск получения травм за счет отсутствия острых углов и резких переходов.

Зона пешеходной доступности является одной из важнейших частей прибрежной территории, она должна быть хорошо структурирована, обеспечивать комфортное и беспрепятственное движение пешеходов, а также безопасные условия передвижения для людей с ограниченными возможностями.

Общественная зона является также важной составляющей прибрежной территории. При ее организации важно учитывать различные социальные интересы населения. Проектом предусмотрены места для отдыха, объекты обслуживания посетителей, городская мебель, малые



*Рис. 5. Концепция, план-проект. Общий вид*  
*Fig. 5. Concept, project. General view*



*Рис. 6. Зона отдыха и приема пищи*  
*Fig. 6. Rest and eating area*

архитектурные формы, наличие художественных объектов, ориентирующей информации для туристов и т. д. (рис. 6). Все элементы общественной зоны соответствуют требованиям безопасности и доступности для различных групп населения.

Зонирование территории для наземного транспорта – один из ключевых элементов городской инфраструктуры. Так как прибрежная территория подразумевает, что данное место является лишь одной из точек на пути следования пассажиров, в проекте важно было предусмотреть автомобильные парковки и безопасные пути следования пассажиров к другим видам транспорта.

Важной частью благоустройства любой территории является ее озеленение [10, 11]. Созда-

ние зеленых зон может положительно повлиять на общую атмосферу и повысить привлекательность территории. При озеленении общественных пространств в Приморском крае необходимо учитывать, что в этом регионе растения сталкиваются с высокой соленостью почвы, ветрами и перепадами температур, и они должны быть хорошо адаптированы к местным условиям.

Одним из способов озеленения территории является использование многолетних растений. Кроме того, можно применять декоративные элементы, такие как камни и природные материалы, сочетать их с растениями, создавая уникальные композиции, которые дают возможность быстрого изменения пространства.

Для организации привлекательных зон зеленых насаждений в данном климате можно использовать следующие виды растений: рододендроны, азалии, гортензии, камелии, шиповник махровый, древовидные пионы и другие виды кустарников, цветущих весной и летом.

Из деревьев наиболее приспособлены к приморскому климату магнолия, амурский тополь, японский кедр, яблони маньчжурская и декоративная пурпурная, калина, черешня, абрикос маньчжурский, сибирский, вишни Максимовича и сахалинская (сакура), клены Гиннала и маньчжурский, сосна японская.

В данном проекте для озеленения прибрежной территории предлагается использовать клен, яблоню маньчжурскую, калину, для живой изгороди – пузыреплодник калинолистный, разные сорта которого позволят создавать интересные сочетания. Туя в горшках будет радовать своим внешним видом, ее можно перемещать и менять тем самым облик пространств.

Зона водных подходов рассматривается как система многофункциональных объектов, расположенных в границах акватории и взаимодействует с прибрежной территорией. Причал с павильоном – это один из элементов транспортной инфраструктуры, который предназначен для посадки и высадки пассажиров, а также для защиты от неблагоприятных погодных условий.

При проектировании и строительстве причала с павильоном для пассажиров необходимо учитывать несколько аспектов. Во-первых, павильон должен иметь прочную и надежную конструкцию, способную выдерживать ветровые нагрузки и условия эксплуатации в морской среде. Во-вторых, быть удобным и комфортным, соответствовать стандартам безопасности и обеспечивать доступность для всех, включая людей с ограниченными возможностями.

Круглая форма павильона позволяет эффективно использовать пространство. В крытой части предусмотрено панорамное остекление, что позволяет максимально задействовать естественное освещение и обеспечивает лучшую обзорность. В целом такая форма является оптимальным решением, обеспечивающим компактность и устойчивость конструкции, а также ее эстетическую привлекательность.

При организации предметно-пространственной среды прибрежных зон можно также предусмотреть использование сопутствующих плавучих конструкций (ресторанов, террас). К преимуществам подобных объектов можно отнести гибкость расположения, быстрый монтаж, а также возможность адаптироваться к изменению уровня воды и погодным условиям.

Создание развитой инфраструктуры является основой для привлечения туристов и создания благоприятных условий для путешествий и отдыха [12, 13].

### **Выводы**

В ходе работы над концепцией прибрежной территории и водных подходов полуострова Песчаного предполагалось решить следующие задачи. Во-первых, включить объекты транспортной инфраструктуры полуострова Песчаного в естественный природный ландшафт. Во-вторых – создать для пассажиров более комфортные условия для ожидания транспорта с возможностью отдохнуть, прогуляться, принять пищу, укрыться от непогоды.

Реализация проекта позволит решить проблему благоустройства прибрежной зоны, наполнит ее новыми функциями, повысит качество городской среды. Концепция может быть востребована при благоустройстве других прибрежных территорий с аналогичными проблемами.

### **Библиографический список**

1. Паромная переправа : сайт. – URL: <http://pereprava.su/> (дата обращения: 20.02.2023). – Текст : электронный.
2. Мыс Песчаный. – Изображение : электронное // [Maps-of-world.ru](https://maps-of-world.ru) = Карта мира : сайт. – URL: <https://www.google.com/maps/@43.1798141,131.7790014,15z?entry=ttu> (дата обращения: 20.05.2023).



3. Мощенко, А. В. Географическое положение и гидрологический режим залива Петра Великого. – Текст : электронный // Дальневосточный геологический институт ДВО РАН : сайт. – URL: <http://www.fegi.ru/primorye/sea/gidro.htm> (дата обращения: 20.05.2023).
4. Опрос как метод получения первичной информации. – Текст : электронный // Grandars.ru : сайт. – URL: <http://www.grandars.ru/college/sociologiya/opros.html> (дата обращения: 23.05.2023).
5. Добренъков, В. И. Методы социологического исследования : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 020300 «Социология» / В. И. Добренъков, А. И. Кравченко. – Москва : ИНФРА-М, 2008. – 767 с. – Текст : непосредственный.
6. Емельянова, А. Комплексное формирование инфраструктуры прибрежных территорий как фактор устойчивого развития городской среды : код направления 54.04.01 «Дизайн» : магистерская диссертация по программе «Дизайн среды» / А. Емельянова ; Санкт-Петербургский государственный университет. – Санкт-Петербург, 2016. – Текст : электронный. – URL: <https://nauchkor.ru/uploads/documents/5a6f88277966e12684eee15c.pdf> (дата обращения: 20.05.2023).
7. Королькова, А. В. Архитектурно-планировочная организация современных морских вокзальных комплексов : диссертация на соискание ученой степени кандидата архитектуры : специальность 05.23.21 «Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности» / А. В. Королькова ; Московский архитектурный институт (Государственная академия). – Москва, 2019. – 227 с. – Текст : электронный. – URL: <https://tehne.com/library/korolkova-v-arhitekturno-planirovochnaya-organizaciya-sovremennyh-morskih-vokzalnyh-kompleksov-moskva-2019> (дата обращения: 10.05.2023).
8. Третьякова, А. А. Проектное предложение по реновации территории речного порта города Тюмени / А. А. Третьякова, А. Н. Федоров. – DOI: 10.31660/2782-232X-2022-2-16-29. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2022. – № 2 (100). – С. 16–29.
9. Королькова, А. В. Методика архитектурного проектирования морских вокзальных комплексов / А. В. Королькова. – Текст : непосредственный // Перспективы науки. – 2017. – № 5 (92). – С. 22–24.
10. Березко, О. М. Ландшафтное обустройство территорий : учебно-методическое пособие / О. М. Березко. – Минск : Белорусский государственный технологический университет, 2015. – 84 с. – Текст : непосредственный.
11. Тлустая, С. Е. Экология, благоустройство и озеленение городской среды / С. Е. Тлустая ; Министерство образования и науки РФ, Дальневосточный федеральный университет, Инженерная школа. – Владивосток : Дальневосточный федеральный университет, 2018. – Текст : электронный. – URL: [https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/029/Tlustaya\\_S.E.\\_Ekologiya.pdf](https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/029/Tlustaya_S.E._Ekologiya.pdf) (дата обращения: 10.05.2023).
12. Руководство по проектированию морских причальных сооружений – РТС-тендер. – Текст : электронный // Электронная площадка России : сайт. – URL: <https://www.rts-tender.ru/poisk/rukovodjajij-dokument/31-31-27-81> (дата обращения: 10.05.2023).
13. Мировой и отечественный опыт проектирования причальных сооружений / А. И. Клименко, О. С. Порошин, А. Н. Федоров, А. Б. Храмов. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2021. – № 1. – С. 6–19.

#### References

1. Paromnaya pereprava. (In Russian). Available at: <http://pereprava.su/> (accessed 20.02.2023).
2. Mys Peschanyu. Maps-of-world.ru. (In Russian). Available at: <https://www.google.com/maps/@43.1798141,131.7790014,15z?entry=ttu> (accessed 20.05.2023).
3. Moshchenko, A. V. Geograficheskoe polozhenie i gidrologicheskij rezhim zaliva Petra Velikogo. Dal'nevostochnyy geologicheskij institut DVO RAN. (In Russian). Available at: <http://www.fegi.ru/primorye/sea/gidro.htm> (accessed 20.05.2023).

4. Opros kak metod polucheniya pervichnoy informatsii. Grandars.ru. (In Russian). Available at: <http://www.grandars.ru/college/sociologiya/opros.html> (accessed 23.05.2023).
5. Dobren'kov, V. I., & Kravchenko, A. I. (2008). *Metody sotsiologicheskogo issledovaniya*. Moscow, INFRA-M Publ., 767 p. (In Russian).
6. Emel'yanova, A. (2016). *Kompleksnoe formirovanie infrastruktury pribrezhnykh territoriy kak faktor ustoychivogo razvitiya gorodskoy sredy*. Saint Petersburg, 163 p. (In Russian). Available at: <https://nauchkor.ru/uploads/documents/5a6f88277966e12684eea15c.pdf> (accessed 20.05.2023).
7. Korol'kova, A. V. (2019). *Arkhitekturno-planirovochnaya organizatsiya sovremennykh morskikh vokzal'nykh kompleksov*. Diss. kand. tekhn. nauk. Moscow, 227 p. (In Russian). Available at: <https://tehne.com/library/korolkova-v-arhitekturno-planirovochnaya-organizatsiya-sovremennykh-morskikh-vokzalnykh-kompleksov-moskva-2019> (accessed 10.05.2023).
8. Tretyakova, A. A., & Fedorov, A. N. (2022). Project proposal for renovation of the territory of the river port of Tyumen. *Architecture, Construction, Transport*, (2(100)), pp. 16-29. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2022-2-16-29.
9. Korolkova, A. V. (2017). Methodology of the architectural design of marine terminal complexes. *Science prospects*, (5(92)), pp. 22-24. (In Russian).
10. Berezko, O. M. (2015). *Landshaftnoe obustroystvo territoriy*. Minsk, Belarusian State Technological University, 84 p. (In Russian).
11. Tlustaya, S. E. (2018). *Ekologiya, blagoustroystvo i ozelenenie gorodskoy sredy*. Vladivostok, Far Eastern Federal University. (In Russian). Available at: [https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/029/Tlustaya\\_S.E.\\_Ekologiya.pdf](https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/029/Tlustaya_S.E._Ekologiya.pdf) (accessed 10.05.2023).
12. *Rukovodstvo po proektirovaniyu morskikh prichal'nykh sooruzheniy – RTS-tender. Elektronnyaya ploshchadka Rossii*. (In Russian). Available at: <https://www.rts-tender.ru/poisk/rukovodjwiji-dokument/31-31-27-81> (accessed 10.05.2023).
13. Klimenko, A. I., Poroshin, O. S., Fedorov, A. N., & Khramtsov, A. B. (2021). World and domestic experience in the design of mooring facilities. *Architecture, Construction, Transport*, (1(95)), pp. 6-19. (In Russian).

#### **Сведения об авторах**

Чикалова Светлана Александровна, магистрант, Дальневосточный федеральный университет, e-mail: [valeriy-chkalov@mail.ru](mailto:valeriy-chkalov@mail.ru)

Тлустый Руслан Евгеньевич, кандидат архитектуры, профессор Департамента архитектуры и дизайна, Дальневосточный федеральный университет, e-mail: [tlustyy.re@dvfu.ru](mailto:tlustyy.re@dvfu.ru)

#### **Information about the authors**

Svetlana A. Chikalova, Graduate Student, Far Eastern Federal University, e-mail: [valeriy-chkalov@mail.ru](mailto:valeriy-chkalov@mail.ru)

Ruslan E. Tlusty, Candidate in Architecture, Professor at the Department of Architecture and Design, Far Eastern Federal University, e-mail: [tlustyy.re@dvfu.ru](mailto:tlustyy.re@dvfu.ru)

*Получена 30 мая 2023 г., одобрена 23 июня 2023 г., принята к публикации 28 сентября 2023 г.  
Received 30 May 2023, Approved 23 June 2023, Accepted for publication 28 September 2023*

УДК 624.074.1

2.1.1 Строительные конструкции,  
здания и сооружения (технические науки)

# ВЛИЯНИЕ ШАГА ДОСОК В ПОПЕРЕЧНОМ СЛОЕ НА ДЕФОРМАТИВНОСТЬ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРЕХСЛОЙНОЙ CLT-ПАНЕЛИ, СМОДЕЛИРОВАННОЙ КАК СОСТАВНАЯ ПЛАСТИНА

М. Ю. Трошин, А. В. Турков

Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Орел, Россия

## THE EFFECT OF THE LAMELLA PITCH IN THE TRANSVERSE LAYER ON THE DEFORMABILITY AND STRESS DISTRIBUTION IN A THREE-LAYER CLT PANEL MODELED AS A COMPOSITE PLATE

Mikhail Yu. Troshin, Andrei V. Turkov

Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia

**Аннотация.** Благодаря малому монтажному весу, простоте изготовления, высокой прочности и долговечности древесина перекрестноклееная (CLT-панель) и конструкции из нее представляют интерес для инженеров и ученых. Тем не менее, многие аспекты до сих пор остаются недостаточно исследованными. В частности, не изучен вопрос изменения деформативности и несущей способности плит при различных вариациях геометрических параметров в слоях конструкции. Было рассмотрено влияние шага поперечного слоя трехслойной плиты из CLT на деформации и распределение возникающих нормальных напряжений. Модель представляла собой составную ортотропную пластинку. В связи с отсутствием единой методики расчета многослойных материалов с ортотропными свойствами в слоях исследования проводились посредством вычислительного комплекса SCAD+ с помощью метода конечных элементов. Были получены, систематизированы

**Abstract.** Cross-laminated timber (CLT panel) and its structures are interesting for engineers and scientists due to its low installation weight, ease of fabrication, high strength and durability. However, many aspects remain under-researched. In particular, the issue of changes in deformability and bearing capacity of slabs under different variations of geometrical parameters in the layers of the structure had not been studied. We studied the effect of the pitch of the transverse layer in a three-layer CLT panel on the deformation and distribution of the resulting normal stresses. The model was a composite orthotropic plate. Because of the lack of a unified methodology for calculating layered materials with orthotropic properties in the layers, the studies were carried out by means of the SCAD+ computational complex using the finite element method. The article obtained, systematized and clearly showed the deflection and stress dependences of varying lamella pitch

и наглядно показаны зависимости прогиба и напряжений от варьирования шага ламелей в поперечном слое CLT-панели, состоящей из трех слоев. Полученные результаты дают более глубокое понимание зависимости деформативности и распределений напряжений от изменения шага досок в поперечном слое плиты. В дальнейшем это позволит изучить возможности оптимизации конструкции CLT-панели с целью уменьшения ее веса, стоимости, сокращения ресурсозатрат при сохранении необходимых характеристик.

**Ключевые слова:** деревянные конструкции, CLT-панели, древесина перекрестноклееная, распределение напряжений, прогиб, составные пластинки

**Для цитирования:** Трошин, М. Ю. Влияние шага досок в поперечном слое на деформативность и распределение напряжений в трехслойной CLT-панели, смоделированной как составная пластина / М. Ю. Трошин, А. В. Турков. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-25-32. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 3 (105). – С. 25–32.

**For citation:** Troshin, M. Yu., & Turkov, A. V. (2023). The effect of the lamella pitch in the transverse layer on the deformability and stress distribution in a three-layer CLT panel modeled as a composite plate. *Architecture, Construction, Transport*, (3(105)), pp. 25-32. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-25-32.

## Введение

Древесина перекрестноклееная (международное название – Cross Laminated Timber (CLT)) – современный материал, востребованный как в малоэтажном, так и в среднеэтажном строительстве. CLT представляет собой многослойную деревянную панель из хвойных и лиственных пород, слои которой расположены крест-накрест относительно друг друга. Характерной особенностью древесины всех пород является анизотропия, поэтому перекрестная склейка способствует появлению высокой сдвиговой жесткости, а также жесткости при поперечном изгибе.

Перекрестное расположение слоев ламелей в панели из CLT позволяет рассматривать ее анизотропию как ортотропную и использовать данный факт при составлении расчетной схемы. Расчетная схема анизотропии клееной древесины определяется анизотропией отдельных слоев и их взаимным расположением [1]. Данный факт

in the transverse layer of a three-layer CLT panel. The results provide a better understanding of the dependence of deformability and stress distributions on the variation of board pitch in the transverse layer of the slab. In the future, this will allow us to explore opportunities to optimize the design of the CLT panel in order to reduce its weight, cost, reduce resource consumption while maintaining the required characteristics.

**Key words:** wooden structures, CLT panels, cross-laminated timber, stress distribution, deflection, composite plates

усложняет расчет конструкций из CLT-панелей, так как возникает необходимость учета ортотропных свойств древесины.

Особенности материала – многослойность и ортотропность – обуславливают большое количество вариантов геометрических параметров отдельных слоев, которые, в свою очередь, сказываются на несущей способности и деформативности CLT-панелей. При этом предполагается, что существуют оптимальные варианты конструкций плиты с сохранением необходимых характеристик, отвечающих нормативным требованиям.

Несмотря на то, что конструкции из древесины перекрестноклееной стали рассматривать еще в середине 1990-х годов, многие аспекты до сих пор изучены недостаточно. Ранее авторами проводились исследования плит на деформативность и несущую способность. Вычисления осуществлялись с использованием метода конеч-

ных элементов, произведенных в SCAD+ [2–4]. Конструкция была смоделирована из объемных конечных элементов.

В настоящей статье, основываясь на исследованиях А. Р. Ржаницына [5], была смоделирована новая расчетная схема в виде ортотропной составной пластинки.

В современных работах встречаются исследования влияния конструктивных параметров на свойства плит или механические свойства составляющих частей плиты. В частности, данный вопрос рассматривался в статье, посвященной изучению анкерных соединений CLT-панелей [6]. Однако большинство исследований направлено на изучение различных характеров нагружения стандартной конфигурации плит [7–8] или методов расчета [9–14]. В связи с этим существует необходимость проведения дополнительных исследований различных вариаций CLT-панелей с измененными геометрическими параметрами.

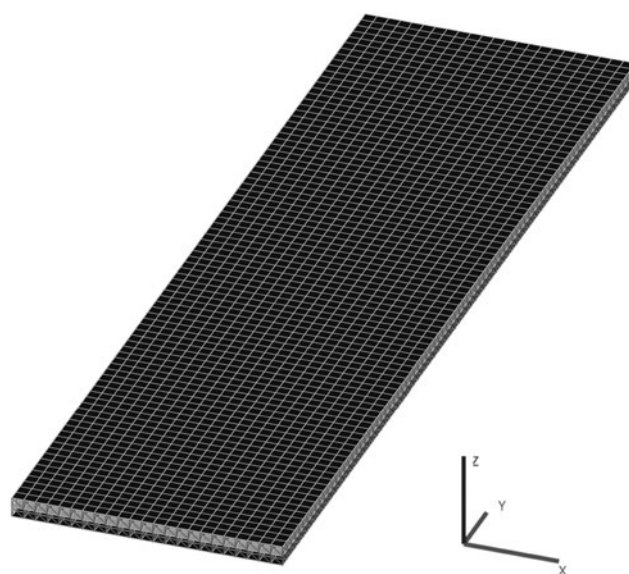
Целью настоящей статьи является исследование несущей способности и деформативности CLT-панели, смоделированной как составная пластинка, при вариации шага расположения ламелей в поперечном (втором) слое. Результаты данного исследования позволяют выделить общие закономерности изменения прогибов и нормальных напряжений в продольных и поперечном слоях трехслойной плиты в зависимости от шага ламелей в поперечном слое.

Для достижения поставленной цели необходимо решить стандартные задачи:

- выбрать шаг досок в поперечном слое;
- смоделировать расчетную конструкцию в соответствии с выбранной расчетной схемой в программном комплексе SCAD+;
- провести симуляции нагружения созданной модели и систематизировать полученные данные;
- провести анализ результатов расчетов и сделать выводы.

#### **Объект и методы исследования**

Исследования были проведены численными методами при помощи программно-вычислительного комплекса SCAD+. В расчетной схеме



*Рис. 1. Общий вид расчетной модели трехслойной плиты из перекрестной древесины в SCAD+*  
*Fig. 1. General view of the calculation model of a three-layer slab from cross wood in SCAD+*

CLT-панель определена как составная пластинка с ортотропными свойствами в перекрестных слоях. Пространственная модель показана на рис. 1.

Для обеспечения высокой точности вычислений были выбраны конечные элементы размером  $50 \times 50$  мм. Связи между слоями представляют собой стержни с очень высокой жесткостью  $5 \cdot 10^4$  кН во избежание их влияния на прогиб плиты. Они разделены на два вида: связи сдвига, препятствующие сдвигающим деформациям, и поперечные связи, не позволяющие сближаться или отдаляться пластинкам друг от друга. Общий вид конечных элементов в слоях составной пластинки представлен на рис. 2.

Плита закреплена по нижнему слою с двух противоположащих сторон пластин по направлению XZ и XYZ (шарнирно подвижная и шарнирно неподвижная опоры). Нагружение плиты задается равномерно распределенной нагрузкой на верхний слой составной пластины равной  $2.5$  кН/м<sup>2</sup>. Конструкция имеет длину  $5\,890$  мм и ширину  $1\,140$  мм. Ламели в слоях имеют ширину  $190$  мм и толщину  $42$  мм. Плоская расчетная схема представляет собой статически определимую балку (рис. 3).

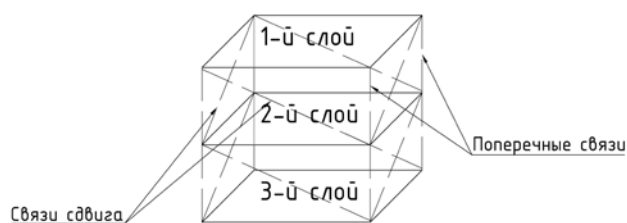


Рис. 2. Конечные элементы в слоях составной пластинки в трехслойной CLT-панели  
Fig. 2. Finite elements in composite plate layers in a three-layer CLT panel

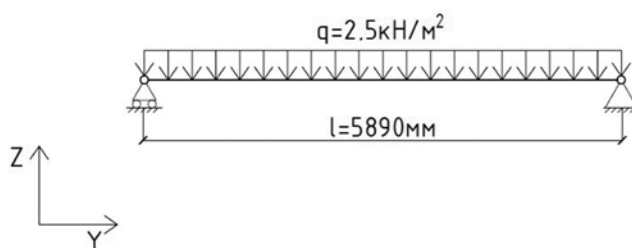


Рис. 3. Расчетная схема трехслойной CLT-панели  
Fig. 3. Design scheme of a three-layer CLT panel

CLT-панель является материалом с ортотропными свойствами, поэтому слоям составной пластинки назначены жесткости с различным значением модулей упругости вдоль  $Ox$  и  $Oy$ , модуля сдвига и коэффициентов Пуассона, числовые значения которых взяты в соответствии с нормативной документацией<sup>1</sup> (таблица 1).

### Результаты

В ходе исследования были рассмотрены конструкции трехслойной плиты из перекрестной древесины с продольным расположением досок в наружных слоях с шагом ламелей 0, 50, 100, 150 мм в поперечном слое с целью определить влияние шага на деформации и распределение

напряжений в продольных (1, 3) и поперечном (2) слоях плиты.

Конечные элементы были организованы по группам в соответствии со слоями, которым они принадлежат. Это позволило рассмотреть изменение деформаций и напряжений в каждом слое в частности.

Линейный расчет производился многофронтальным методом в SCAD+. В результате были отобраны максимальные значения исследуемых параметров в узлах и элементах (таблица 2).

Таблица 1  
Table 1

Упругие характеристики ортотропных элементов трехслойной CLT-панели  
Elastic characteristics of orthotropic elements of a three-layer CLT panel

Модуль упругости в продольном направлении, кН/м <sup>2</sup>	
$E_x$	$E_y$
400 000	10 000 000
Модуль сдвига в продольном направлении, кН/м <sup>2</sup>	
$G_{xy}$	
500 000	
Коэффициент Пуассона	
$\nu_{xy}$	$\nu_{yx}$
0.45	0.018
Модуль упругости в поперечном направлении, кН/м <sup>2</sup>	
$E_x$	$E_y$
10 000 000	400 000
Модуль сдвига в поперечном направлении, кН/м <sup>2</sup>	
$G_{xy}$	
500 000	
Коэффициент Пуассона	
$\nu_{xy}$	$\nu_{yx}$
0.018	0.45

<sup>1</sup> Деревянные конструкции = Timber structures : (СП 64.13330.2017) : Актуализированная редакция СНиП II-25-80 : утвержден приказом Министерства строительства и ЖКХ РФ от 27 февраля 2017 г. № 129/пр и введен в действие с 28 августа 2017 г. / исполнитель – АО «НИЦ «Строительство» – ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456082589> (дата обращения: 14.07.2023).

Таблица 2  
Table 2

Трехслойная плита из древесины перекрестно-клееной с изменяемым шагом ламелей в поперечном слое  
Three-layer cross-laminated timber with variable lamella pitch in the cross-layer

№ слоя	Шаг в поперечном слое, мм	$u$ , мм	$\sigma_x$ , кН/м <sup>2</sup>	$\sigma_y$ , кН/м <sup>2</sup>
1, 3	0	-24.46	-26.73	-2 847.43
	50	-24.57	-24.55	-2 853.69
	100	-24.69	-23.23	-2 855.83
	150	-24.75	-22.58	-2 858.96
2	0	-24.46	-24.77	-15.67
	50	-24.57	-33.82	-24.04
	100	-24.69	-39.82	-34.36
	150	-24.75	-45.01	-43.21

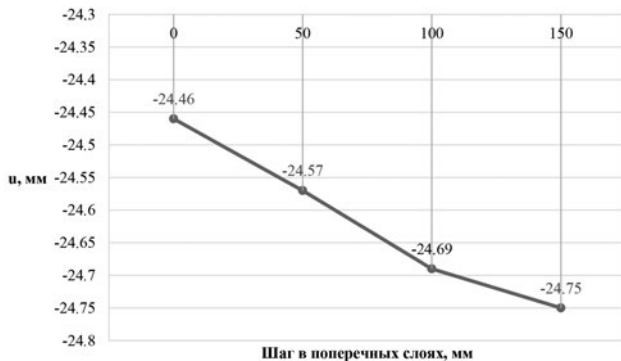


Рис. 4. Зависимость прогиба от шага ламелей в поперечном слое

Fig. 4. Dependence of deflection on lamella pitch in the transverse layer

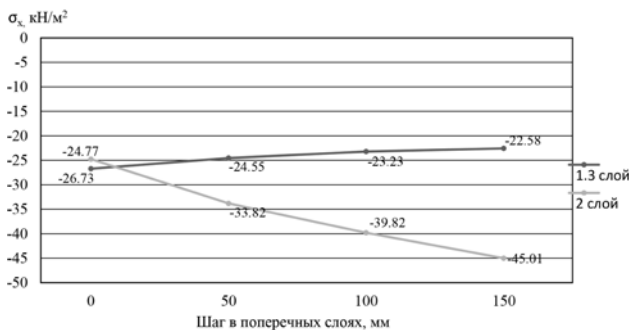


Рис. 5. Зависимость нормальных напряжений  $\sigma_x$  от шага ламелей в поперечном слое

Fig. 5. Dependence of normal stresses  $\sigma_x$  on lamella pitch in the transverse layer

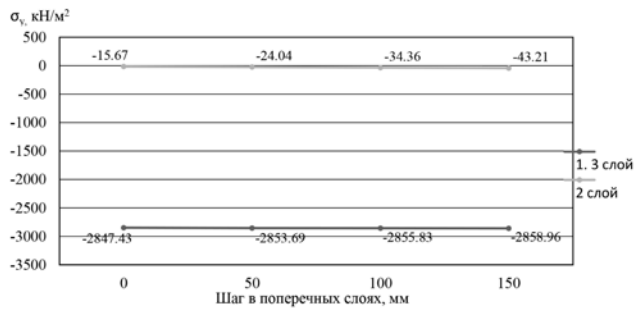


Рис. 6. Зависимость нормальных напряжений  $\sigma_y$  от шага ламелей в поперечном слое

Fig. 6. Dependence of normal stresses  $\sigma_y$  on lamella pitch in the transverse layer

На основе полученных результатов построены линейные графики зависимостей вычисляемых параметров от шага досок в поперечном слое (рис. 4–6).

### Выводы

По результатам расчета трехслойной CLT-плиты, смоделированной как составная пластина, при действии статической равномерно распределенной нагрузки выявлено, что:

1) при увеличении расстояния между ламелями в поперечном слое практически не изменяется величина прогибов плиты, разница между наименьшим и наибольшим значением составляет менее 5 %. При данном виде нагружения деформациям препятствуют наружные продольно расположенные слои, которые в данном исследовании являются неизменяемыми. Этим обусловлена малая величина изменения прогибов при изменении шага досок в поперечном слое;

2) при увеличении шага досок происходит перераспределение напряжений, это приводит к уменьшению нормальных напряжений вдоль OX в наружных продольных слоях плиты и, наоборот, увеличению в поперечном слое;

3) при увеличении шага досок значительно увеличиваются нормальные напряжения вдоль OY (более чем в 2 раза) в поперечном слое и практически не изменяются (0.3 %) в наружных продольных слоях. Это свидетельствует о том, что при данном виде опирания панели поперечный слой практически не оказывает влияния на нормальные напряжения вдоль OY. Это также

подтверждается существенной разницей (180 раз) между соответствующими значениями напряжений при одинаковом шаге ламелей.

Полученные результаты указывают на взаимосвязь деформативности и распределений

напряжений в слоях и изменения шага досок в поперечном слое плиты. В ходе дальнейших исследований представляется необходимым изучить возможности оптимизации конструкции CLT-панели и улучшения ее характеристик.

### Библиографический список

1. Ашкенази, Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов / Е. К. Ашкенази. – Москва : Лесная промышленность, 1978. – 224 с. – Текст : непосредственный.
2. Турков, А. В. Влияние шага поперечных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах древесины перекрестно-клееной / А. В. Турков, М. Ю. Трошин. – Текст : непосредственный // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, приуроченной к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий, Омск, 24–25 ноября 2022 года. – Омск : Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. – С. 515–519.
3. Трошин, М. Ю. Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах древесины перекрестно-клееной / М. Ю. Трошин, А. В. Турков. – DOI 10.22227/1997-0935.2023.3.391-400. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 3. – С. 391–400.
4. Трошин, М. Ю. Влияние шага поперечных слоев на деформативность и распределение напряжений в пятислойных плитах древесины перекрестно-клееной / М. Ю. Трошин, А. В. Турков. – DOI 10.33979/2073-7416-2023-107-3-35-41. – Текст : непосредственный // Строительство и реконструкция. – 2023. – № 3 (107). – С. 35–41.
5. Ржаницын, А. Р. Составные стержни и пластинки / А. Р. Ржаницын. – Москва : Стройиздат, 1986. – 316 с. – Текст: непосредственный.
6. Failure modes and mechanical properties of bracket anchor connections for cross-laminated-timber / Y. Shen, J. Schneider, S. F. Stiemer, X. Ren. – DOI 10.1051/mateconf/201927501011. – Текст : электронный // MATEC Web of Conferences – 2019. – No 275(11):01011. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/331709903\\_Failure\\_Modes\\_and\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_Bracket\\_Anchor\\_Connections\\_for\\_Cross-Laminated-Timber](https://www.researchgate.net/publication/331709903_Failure_Modes_and_Mechanical_Properties_of_Bracket_Anchor_Connections_for_Cross-Laminated-Timber) (дата обращения: 07.08.2023).
7. Evaluation of the mechanical properties of cross Laminated timber with elementary beam theories compression / I. P. Christovasilis, M. Brunetti, M. Follesa [et al.]. – DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.082. – Текст : электронный // Construction and Building Materials. – 2016. – No 122:202-213. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/304355276\\_Evaluation\\_of\\_the\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_Cross\\_Laminated\\_Timber\\_with\\_Elementary\\_Beam\\_Theories](https://www.researchgate.net/publication/304355276_Evaluation_of_the_Mechanical_Properties_of_Cross_Laminated_Timber_with_Elementary_Beam_Theories) (дата обращения: 07.08.2023).
8. Особенности поведения древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) при статических и динамических нагрузках, моделирующих сейсмические воздействия / А. Бубис, И. Р. Гизятуллин, А. Н. Хворова, И. Ю. Петров. – DOI 10.37153/2618-9283-2022-2-62-80. – Текст : непосредственный // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2022. – № 2. – С. 62–80.
9. Рогожина, А. В. Расчет деформативности CLT-панели перекрытия / А. В. Рогожина. – Текст : непосредственный // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 6 (90). – С. 329–339.
10. Филимонов, М. А. Исследования прочностных и упругих характеристик плит из древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) российского производства / М. А. Филимонов, П. Н. Смирнов. – DOI



- 10.37153/2618-9283-2022-2-81-97. – Текст : непосредственный // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2022. – № 2. – С. 81–97.
11. Методика расчета панелей из перекрестно клееной древесины / Ш. М. Мамедов, Е. Г. Шабикова, Д. В. Нижегородцев, Т. Н. Казакевич. – DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-5-66-71. – Текст : непосредственный // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 5 (82). – С. 66–71.
  12. Чебыкин, А. А. Определение расчетных характеристик сечений древесных клееных плит из перекрестных досок / А. А. Чебыкин, Ю. А. Фрицлер, С. В. Кудрявцев. – Текст : непосредственный // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2017. – № 2 (33). – С. 83–85.
  13. Определение прочностных и упругих характеристик древесины перекрестно клееной (ДПК/CLT) и классификация по классам прочности : отчет о НИР / Научно-исследовательский центр «Строительство» ; А. А. Погорельцев, М. А. Филимонов, П. Н. Смирнов. – Москва, 2020. – 175 с. – Текст : непосредственный.
  14. Проведение исследований по определению несущей способности стеновых панелей и плит перекрытия из древесины перекрестно клееной (ДПК/CLT) и разработка методики расчета : отчет о НИР / Научно-исследовательский центр «Строительство» ; А. А. Погорельцев, П. Н. Смирнов, М. А. Филимонов. – Москва, 2020. – 268 с. – Текст : непосредственный.

#### References

1. Ashkenazi, E. K. (1978). Anizotropiya drevesiny i drevesnykh materialov. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 224 p. (In Russian).
2. Turkov, A. V., & Troshin, M. Y. (2022). The effect of the step of transverse layers on the deformability and stress distribution in three-layer slabs of cross-laminated timber. *Arkhitekturno-stroitel'nyy i dorozhno-transportnyy kompleksy: problemy, perspektivy, innovatsii. Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, priurochennoy k provedeniyu v Rossiyskoy Federatsii Desyatiletiya nauki i tekhnologii*, November, 24-25. Omsk, Siberian state automobile and highway university Publ., 515-519 pp. (In Russian).
3. Troshin, M. Yu., & Turkov, A. V. (2023). The effect of thickness of transverse and longitudinal layers on deformability and stress distribution in three-layer panels made of cross-laminated timber. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*, 18(3), 391-400 pp. (In Russian). DOI 10.22227/1997-0935.2023.3.391-400.
4. Troshin, M. Yu., & Turkov, A. V. (2023). The effect of the step of transverse layers on the deformability and stress distribution in five-layer slabs of CLT-panels. *Building and reconstruction*, (3(107)), 35-41 pp. (In Russian). DOI 10.33979/2073-7416-2023-107-3-35-41.
5. Rzhantsyn, A. R. (1986). *Sostavnye sterzhni i plastinki*. Moscow, Stroyizdat Publ., 316 p. (In Russian).
6. Shen, Y., Schneider, J., Stiemer, S. F., & Ren, X. (2019). Failure modes and mechanical properties of bracket anchor connections for cross-laminated-timber. *MATEC Web of Conferences*, No 275(11):01011. (In English). Available at: [https://www.researchgate.net/publication/331709903\\_Failure\\_Modes\\_and\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_Bracket\\_Anchor\\_Connections\\_for\\_Cross-Laminated-Timber](https://www.researchgate.net/publication/331709903_Failure_Modes_and_Mechanical_Properties_of_Bracket_Anchor_Connections_for_Cross-Laminated-Timber) (accessed 07.08.2023). DOI 10.1051/mateconf/201927501011.
7. Christovasilis, I. P., Brunetti, M., Follasa, M., Nocetti, M., & Vassallo, D. (2016). Evaluation of the mechanical properties of cross laminated timber with elementary beam theories compression. *Construction and building materials*, No 122:202-213. (In English). Available at: [https://www.researchgate.net/publication/304355276\\_Evaluation\\_of\\_the\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_Cross\\_Laminated\\_Timber\\_with\\_Elementary\\_Beam\\_Theories](https://www.researchgate.net/publication/304355276_Evaluation_of_the_Mechanical_Properties_of_Cross_Laminated_Timber_with_Elementary_Beam_Theories) (accessed 07.08.2023). DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.082.

8. Bubis, A. A., Giziatullin, I. R., Petrov, I. Yu., & Khvorova, A. N. (2022). Peculiarities of behavior of cross-laminated timber (CLT) under static and dynamic loads simulating seismic impacts. *Earthquake engineering. Constructions safety*, (2), 62-80 pp. (In Russian). DOI 10.37153/2618-9283-2022-2-62-80.
9. Rogozhina, A. V. (2022). Calculation of the deformability of the CLT overlap panel. *Engineering journal of Don*, (6(90)), pp. 329-339. (In Russian).
10. Filimonov, M. A., & Smirnov, P. N. (2022). Research of strength and elastic characteristics of Russian-made cross laminated timber slabs. *Earthquake engineering. Constructions safety*, (2), pp. 81-97. (In Russian). DOI 10.37153/2618-9283-2022-2-81-97.
11. Mamedov, Sh. M., Shabikova, E. G., Nizhegorodtsev, D. V., & Kazakevich, T. N. (2020). Method for calculating cross laminated timber panels. *Bulletin of civil engineers*, (5(82)), pp. 66-71. (In Russian). DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-5-66-71.
12. Chebykin, A. A., Fritzler, U. A., & Kudryavtsev, S. V. (2017). Evaluation of cross section design properties for plates from cross laminated timber. *Akademicheskij vestnik Uralniiproekt RAASN*, (2(33)), pp. 83-85. (In Russian).
13. Pogoreltsev, A. A., Filimonov, M. A., & Smirnov, P. N. (2020). Opredelenie prochnostnyh i uprugih harakteristik drevesiny perekrestno kleenoy (DPK/CLT) i klassifikacija po klassam prochnosti: otchet o NIR. Moscow, 175 p. (In Russian).
14. Pogoreltsev, A. A., Smirnov, P. N., & Filimonov, M. A. (2020). Provedenie issledovaniy po opredeleniyu nesushchey sposobnosti stenovykh paneley i plit perekrytiya iz drevesiny perekrestno kleenoy (DPK/CLT) i razrabotka metodiki rascheta: otchet o NIR. Moscow, 268 p. (In Russian).

#### **Сведения об авторах**

Трошин Михаил Юрьевич, аспирант кафедры строительных конструкций и материалов, Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, e-mail: mtr997@mail.ru

Турков Андрей Викторович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций и материалов, Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, e-mail: aturkov@bk.ru

#### **Information about the authors**

Mikhail Yu. Troshin, Postgraduate at the Department of Building Structures and Materials, Orel State University named after I. S. Turgenev, e-mail: mtr997@mail.ru

Andrei V. Turkov, Doctor in Engineering, Associate Professor, Professor at the Department of Building Structures and Materials, Orel State University named after I. S. Turgenev, e-mail: aturkov@bk.ru

*Получена 25 августа 2023 г., одобрена 15 сентября 2023 г., принята к публикации 28 сентября 2023 г.  
Received 25 August 2023, Approved 15 September 2023, Accepted for publication 28 September 2023*

# РАСЧЕТ ОСАДОК ПРОТЯЖЕННОГО ПЛИТНОГО ФУНДАМЕНТА КОНЕЧНОЙ ЖЕСТКОСТИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Л. А. Бартоломей<sup>1</sup>, О. А. Богомолова<sup>2</sup>, Л. В. Гейдт<sup>1</sup>, А. В. Гейдт<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

<sup>2</sup> Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

## CALCULATION OF SETTLEMENT OF AN EXTENDED SLAB FOUNDATION OF FINITE STIFFNESS BASED ON COMPUTER MODELLING DATA

Leonid A. Bartolomey<sup>1</sup>, Oksana A. Bogomolova<sup>2</sup>, Larisa V. Geidt<sup>1</sup>, Andrei V. Geidt<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Industrial University of Tyumen, Russia

<sup>2</sup> Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

**Аннотация.** Построена база данных, с помощью которой на начальной стадии проектирования можно оценить величину осадки протяженного плитного фундамента конечной жесткости, используя лишь интерполяционные методы, без привлечения мощных вычислительных устройств. Для получения результата использована компьютерная программа FEA, в которой формализован метод конечных элементов. Максимальные горизонтальный и вертикальный размеры расчетных схем в исследовании составляют  $25H_3 \cdot 46H_3$ ; расчетная схема состоит из 57 500 конечных элементов в форме прямоугольных равнобедренных треугольников, сопряженных в 29 106 узлах, ширина матрицы жесткости системы линейных уравнений равна 466. Это позволило исключить влияние тривиальных граничных

**Abstract.** The paper presents a database for estimation the magnitude of the settlement of an extended slab foundation of finite stiffness in the initial phase of projecting. The offered solution uses only interpolation methods without involving powerful computing devices. The computer program FEA, which formalises the finite element method, was used to obtain the result. The maximum horizontal and vertical dimensions of the computational schemes were  $25H_3 \cdot 46H_3$ . The computational scheme consisted of 57 500 finite elements in the form of right isosceles triangles conjugated at 29 106 nodes. The width of the stiffness matrix of the linear equation system was 466. This made it possible to eliminate the influence of trivial boundary conditions on the results. 560 computational operations were performed. It corresponded to

условий на результаты вычислений. Выполнено 560 вычислительных операций, что соответствует числу возможных сочетаний численных значений переменных расчетных параметров, принятых при компьютерном моделировании процесса осадки плитного фундамента. В результате вычислений составлена таблица коэффициентов аппроксимирующих выражений для кривых, построенных по результатам найденных зависимостей осадок плитного фундамента от переменных расчетных параметров. Проведен расчет осадок двух протяженных плитных фундаментам различной ширины, при котором использована построенная база данных и интерполяционные методы. Контрольный расчет, выполненный при помощи FEA, показал, что величины контрольных осадок отличаются на 13.45 и 22.08 % от соответствующих значений осадок, полученных при помощи предложенных таблиц и метода линейной интерполяции. Сделан вывод о возможности использования полученной базы данных для проведения предварительных (оценочных) расчетов осадок протяженных плитных фундаментам.

**Ключевые слова:** осадка фундамента, протяженный плитный фундамент конечной жесткости, метод конечных элементов, прочностные и деформационные свойства грунта, модуль упругости и коэффициент Пуассона бетона, коэффициенты аппроксимирующих выражений, интерполяционные методы

**Для цитирования:** Расчет осадок протяженного плитного фундамента конечной жесткости на основе данных компьютерного моделирования / Л. А. Бартоломей, О. А. Богомолова, Л. В. Гейдт, А. В. Гейдт. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-33-47. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 3 (105). – С. 33–47.

**For citation:** Bartolomey, L. A., Bogomolova, O. A., Geidt, L. V., & Geidt, A. V. (2023). Calculation of settlement of an extended slab foundation of finite stiffness based on computer modelling data. *Architecture, Construction, Transport*, (3(105)), pp. 33-47. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-33-47.

### Введение

Существует процедура, предшествующая расчету оснований по второй группе предель-

the number of possible combinations of numerical values of the variables calculated parameters adopted in computer modelling of process of the slab foundation settlement. As an upshot of the computations, the authors made a table of coefficients of approximating expressions for the curves constructed from the results of the calculated dependences of slab foundation settlement on the variable design parameters. The article provides a calculation of settlements of two extended slab foundations of different widths, using a constructed database and interpolation methods. The control calculation in the FEA showed the difference between the values of the control settlements and the values obtained using the proposed tables and the linear interpolation method for 13.45 and 22.08 %. Summing up the results, the offered database can be used for preliminary (estimation) calculations of extended slab foundations settlements.

**Key words:** foundation settlement, extended slab foundation of finite stiffness, finite element method, strength and deformation properties of soil, modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete, coefficients of approximating expressions, interpolation methods

ных состояний (по деформациям), которая состоит в определении величины их расчетного сопротивления  $R$ . Если нагрузка на основание

не превосходит этой величины, то расчет осадок можно вести в упругой постановке, согласно [1], СП 22.13330.2016<sup>1</sup>.

Величина расчетного сопротивления  $R$  должна соответствовать выполнению условия, при котором глубина развития пластических областей, образующихся под краями фундамента, не должна превышать четверти его ширины, то есть  $\Delta z \leq b / 4$ . Исходя из этого условия, величина расчетного сопротивления вычисляется по формуле:

$$R = \frac{\pi(0.25\gamma b + \gamma h + c \cdot ctg\varphi)}{ctg\varphi + \varphi - \pi / 2} + \gamma h. \quad (1)$$

Анализируя формулу (1), отмечаем, что в ее транскрипцию не входят такие важные величины, как коэффициент Пуассона  $\nu$  (коэффициент бокового давления  $\xi_0$ ), модуль упругости  $E$  материала фундамента и модуль деформации  $E_0$  грунтового основания, гибкость (жесткость) фундамента, величина отношения глубины заложения фундамента  $H$  к его ширине  $b$  и так далее, которые оказывают существенное влияние на напряженное состояние активной зоны фундамента и процесс образования и развития пластических областей [2, 3]. Возможно, именно из-за этого величины расчетного сопротивления основания, вычисляемые по формуле (1), оказываются сильно завышенными, о чем свидетельствуют результаты исследований [4–6]. Отметим, что в числитель формулы (1) входит величина ширины фундамента  $b$ . Как отмечено в работах [7, 8], при увеличении  $b$  происходит необоснованный рост величины расчетного сопротивления.

Все вышесказанное можно в полном объеме отнести и к величине предельно допустимой  $P_{nd}$  или, что одно и то же, второй критической на-

грузке  $P_{кр}^2$ , формула для определения которой приводится в работах Л. Прандтля [9] и Х. Рейснера [10]:

$$P_{кр}^2 = P_{nd} = (q + c \cdot ctg\varphi) \frac{(1 + \sin\varphi)}{(1 - \sin\varphi)} \cdot e^{\pi ctg\varphi} - c \cdot ctg\varphi. \quad (2)$$

Анализ теоретических [11–13] и экспериментальных [14–16] исследований говорит о том, что численные значения критических нагрузок, получаемых при использовании формул (1) и (2), являются существенно завышенными.

Резонно предположить, что существенное превышение вычисленных при помощи формулы (1) значений расчетного сопротивления  $R$  над фактическим его значением приводит к ситуации, когда действительные осадки фундаментов оказываются значительно больше их расчетных значений [17].

Ранее нами введено понятие «обобщенных прочностных параметров грунта основания  $\sigma_{св}^{R*}$  и  $\sigma_{св}^R$ » [18]. В данной статье в виде графиков, формул и таблиц приведены результаты вычислений для определения параметров  $\sigma_{св}^{R*}$  и  $\sigma_{св}^R$ , численные значения которых позволяют судить, можно ли в том или ином случае вести расчет осадок плитного фундамента в упруго-линейной постановке. Расчеты выполнены как с учетом жесткости надфундаментной части сооружения ( $\sigma_{св}^{R*}$ ), так и без него ( $\sigma_{св}^R$ ). Предположим, что слабый грунт основания закреплен, определены его улучшенные физико-механические характеристики и величина приведенного давления связности  $\sigma_{св} = c(\gamma_0 H ctg\varphi)^{-1}$ . Если будут выполняться неравенства  $\sigma_{св} \geq \sigma_{св}^{R*}$  или  $\sigma_{св} \geq \sigma_{св}^R$ , то силовые эквиваленты внешнего воздействия ( $q$  и  $H^*$ ) не превышают величины рас-

<sup>1</sup> Основания зданий и сооружений = Soil bases of buildings and structure : СП 22.13330.2016 : утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. № 970/пр. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054206> (дата обращения: 03.09.2023).

четного сопротивления и расчет осадок основания можно проводить в линейной постановке.

В настоящей статье приведены результаты вычисления осадок плитного фундамента конечной жесткости, под которыми подразумеваем вертикальные перемещения точек расположенной в месте пересечения вертикальной оси симметрии фундамента и его подошвы. При проведении вычислений приняты следующие значения переменных расчетных параметров: отношение модуля упругости материала фундамента и модуля деформации грунта равны  $\frac{E}{E_0} = 1; 5; 10; 20; 50; 100; 1000$ ; величина отношения

ширины фундамента к глубине его заложения  $\frac{2b}{H_3} = 2; 4; 6; 10; 20$ , что охватывает весь возможный диапазон их изменения при расчете реальных объектов.

Численное значение коэффициента бокового давления материала фундамента принято постоянным и равным  $\xi_0 = 0.2$ , а численные значения этого коэффициента для грунта были равны  $\xi_0 = 0.15; 0.28; 0.5; 0.6$ . Проведено 560 вычислительных операций, в результате которых получены безразмерные (в долях  $H_3$ ) значения вертикальных перемещений. Здесь же приведены основные результаты анализа влияния численных значений переменных расчетных параметров на величину осадок.

Если  $\frac{E}{E_0} = 1$ , то равномерно распределенная нагрузка приложена непосредственно к поверхности грунта (гибкий фундамент).

Целью настоящей работы является получение базы данных, с помощью которой можно на начальной стадии проектирования быстро и без привлечения мощных вычислительных устройств оценить величину осадки плитного фундамента конечной жесткости.

#### Объект и методы исследования

Объектом исследования выступает однородное и модифицированное (квазиоднородное) основание протяженного плитного фундамента.

Метод исследования – многофакторный численный (на основе метода конечных элементов (МКЭ)) анализ напряженно-деформированного состояния и осадок плитного фундамента конечной жесткости.

#### Результаты

Для определения осадок фундаментов использована компьютерная программа [19], в которой реализован метод конечных элементов [20].

Если расчетная схема МКЭ абсолютно симметрична относительно вертикальной оси (как в нашем случае), то при численном моделировании можно рассматривать лишь одну ее половину [21] (рис. 1).

Отметим, что максимальные размеры расчетных схем, которые использованы при проведении исследования, равны  $25H_3 \cdot 46H_3$  (горизонтальный и вертикальный размеры). В этом случае расчетная схема состоит из 57 500 конечных элементов в форме прямоугольных равнобедренных треугольников, сопряженных в 29 106 узлах, а ширина матрицы жесткости системы линейных

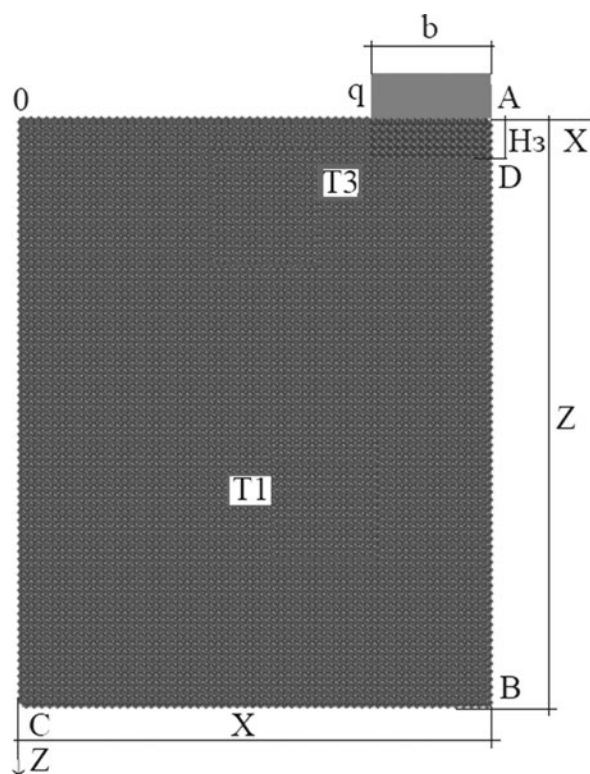


Рис. 1. Расчетная схема метода конечных элементов  
Fig. 1. The calculation scheme of the finite element method

уравнений равна 466. Такие линейные размеры расчетных схем практически исключают влияние тривиальных граничных условий на результаты вычислений [22].

В связи с тем, что объем статьи ограничен, в качестве примера приведена одна из четырех составленных нами таблиц (таблица 1), в каждой из которых содержится 140 численных значений

Таблица 1  
Table 1

Значения безразмерных осадок протяженного плитного фундамента  
Values of the dimensionless settlements of extended slab foundations

$2b/H_3 = 2; q/\gamma H_3 = 3; S/H_3$							
$\xi_0 \backslash E/E_0$	1	5	10	20	50	100	1000
0.15	0.000090	0.000448	0.000891	0.004468	0.004468	0.008936	0.089178
0.38	0.000075	0.000370	0.000741	0.001479	0.003699	0.007395	0.073842
0.5	0.000063	0.000314	0.000627	0.001254	0.003133	0.006267	0.062656
0.6	0.000052	0.000261	0.000521	0.001042	0.002604	0.005207	0.051945
$2b/H_3 = 4; q/\gamma H_3 = 3; S/H_3$							
$\xi_0 \backslash E/E_0$	1	5	10	20	50	100	1000
0.15	0.000092	0.000460	0.000919	0.001836	0.004576	0.009146	0.091179
0.38	0.000077	0.000382	0.000762	0.001522	0.003800	0.0075930	0.075699
0.5	0.000065	0.000325	0.000648	0.001294	0.003230	0.006454	0.064597
0.6	0.000054	0.000271	0.000541	0.001080	0.002695	0.005484	0.053667
$2b/H_3 = 6; q/\gamma H_3 = 3; S/H_3$							
$\xi_0 \backslash E/E_0$	1	5	10	20	50	100	1000
0.15	0.000089	0.000444	0.000889	0.001778	0.004437	0.008874	0.088624
0.38	0.000073	0.000392	0.000781	0.001559	0.003888	0.007760	0.0772700
0.5	0.000062	0.000307	0.000615	0.001231	0.003078	0.006157	0.061592
0.6	0.000051	0.000254	0.000508	0.001016	0.002541	0.005084	0.050774
$2b/H_3 = 10; q/\gamma H_3 = 3; S/H_3$							
$\xi_0 \backslash E/E_0$	1	5	10	20	50	100	1000
0.15	0.000097	0.000486	0.000971	0.001938	0.004823	0.009626	0.095500
0.38	0.000081	0.000406	0.000810	0.001617	0.004033	0.008047	0.079645
0.5	0.000070	0.000347	0.000693	0.001384	0.003449	0.006875	0.068170
0.6	0.000059	0.000292	0.000583	0.001163	0.002900	0.005777	0.056809
$2b/H_3 = 20; q/\gamma H_3 = 3; S/H_3$							
$\xi_0 \backslash E/E_0$	1	5	10	20	50	100	1000
0.15	0.000103	0.000512	0.001022	0.002040	0.005081	0.010147	0.100495
0.38	0.000086	0.000428	0.000854	0.001706	0.004262	0.008510	0.084077
0.5	0.000073	0.000367	0.000732	0.001425	0.003653	0.007295	0.071874
0.6	0.000062	0.000309	0.000617	0.001239	0.003080	0.006156	0.060278

безразмерных (в долях  $H_3$ ) вертикальных перемещений  $S$ .

*Анализ результатов.* Используя данные таблиц и интерполяционные методы, можно для любого возможного сочетания численных значений переменных расчетных параметров, которые ограничены рамками, оговоренными выше, определить вертикальные перемещения (осадки) протяженных плитных фундаментов.

Кроме того, эти данные позволили провести анализ влияния численных значений переменных расчетных параметров на величину осадок плитного фундамента. Такими параметрами, как говорилось выше, являются: интенсивность внешнего воздействия ( $q/\gamma H_3$ ), отношение шири-

ны фундамента к глубине его заложения ( $2b/H$ ), отношение модуля упругости материала фундамента и модуля деформации грунта основания ( $E/E_0$ ) и коэффициент бокового давления грунта ( $\xi_0$ ), или отношение коэффициентов бокового давления материала фундамента и грунта ( $\xi/\xi_0$ ). Величина коэффициента бокового давления материала фундамента определена при помощи известной формулы по величине коэффициента Пуассона  $\nu$  и принята равной  $\xi = 0.2$ .

На рис. 2 приведены графические зависимости величины осадки фундамента от численных значений переменных расчетных параметров.

Зависимости вида  $S/H_3 = f(E/E_0)$  и  $S/H_3 = f(q/\gamma H)$  являются линейными. Графические аппроксима-

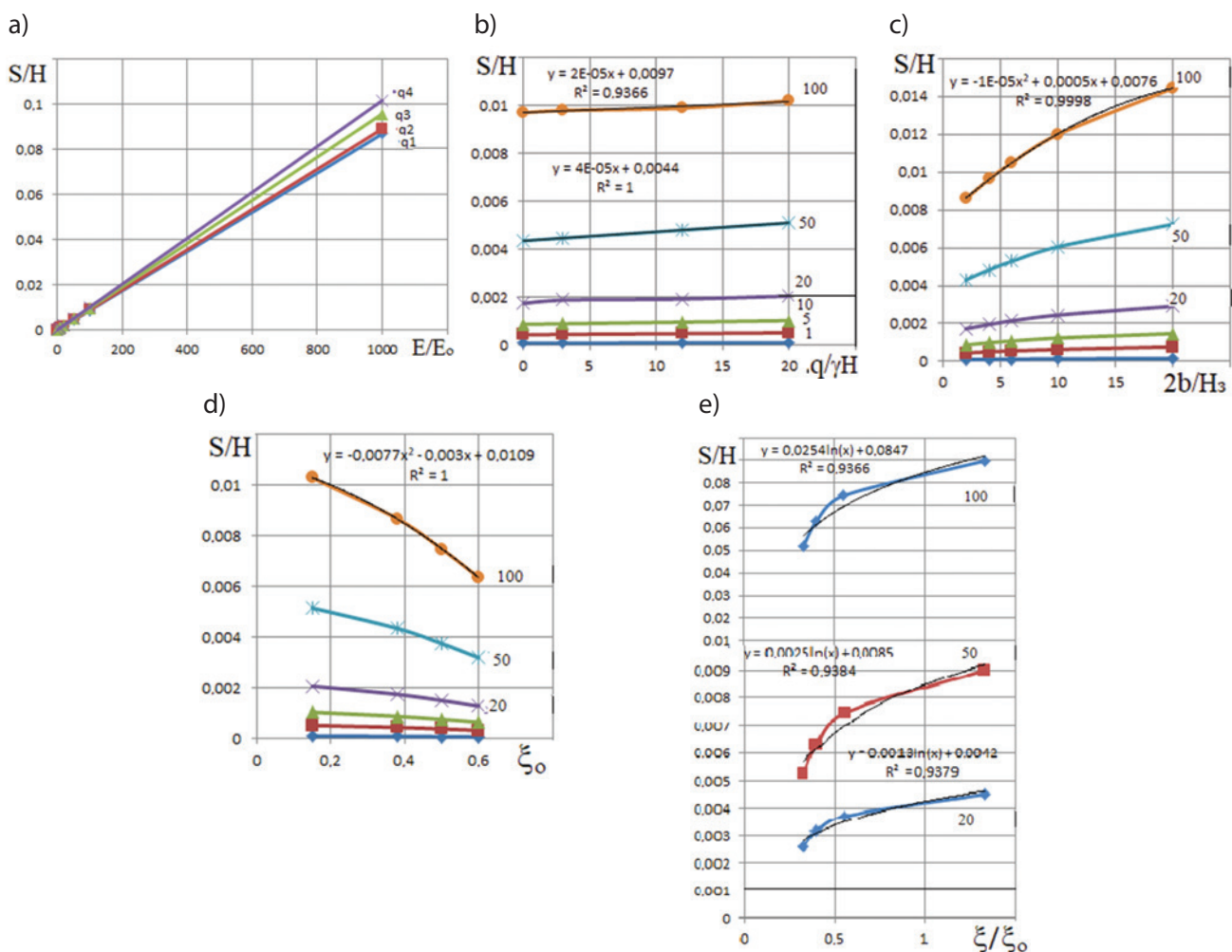


Рис. 2. Графические зависимости вида  $S/H_3 = f(E/E_0)$  (a),  $S/H_3 = f(q/\gamma H)$  (b) при  $2b/H_3 = 2$  и  $\xi_0 = 0.15$ ; графические зависимости вида  $S/H_3 = f(2b/H_3)$  (c) при  $q/\gamma H_3 = 20$ ;  $S/H_3 = f(\xi_0)$  (d) и  $S/H_3 = f(\xi/\xi_0)$  (e) при  $2b/H_3 = 4$  и  $q/\gamma H_3 = 12$   
 Fig. 2. Graphical dependences of  $S/H_3 = f(E/E_0)$  (a),  $S/H_3 = f(q/\gamma H)$  (b) at  $2b/H_3 = 2$  and  $\xi_0 = 0.15$ ; graphical dependences of  $S/H_3 = f(2b/H_3)$  (c) at  $q/\gamma H_3 = 20$ ;  $S/H_3 = f(\xi_0)$  (d) and  $S/H_3 = f(\xi/\xi_0)$  (e) at  $2b/H_3 = 4$  and  $q/\gamma H_3 = 12$



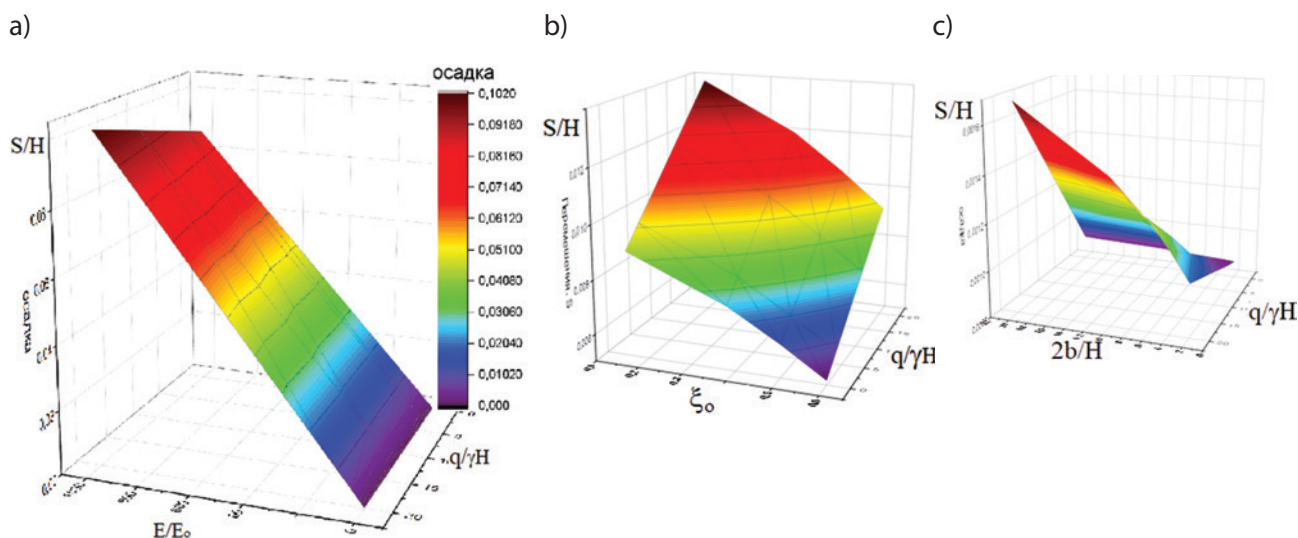


Рис. 3. Функциональные поверхности вида  $S/H_3 = f(E/E_0; q/\gamma H_3)$  при  $2b/H_3 = 2$  (a);  $S = f(\xi_0; q/\gamma H)$  при  $2b/H = 10$  и  $E/E_0 = 100$  (b);  $S = f(2b/H_3; q/\gamma H_3)$  при  $\xi_0 = 0.15$  и  $E/E_0 = 10$  (c)  
 Fig. 3. Functional surfaces of the form  $S/H_3 = f(E/E_0; q/\gamma H_3)$  at  $2b/H_3 = 2$  (a);  $S = f(\xi_0; q/\gamma H)$  at  $2b/H = 10$  and  $E/E_0 = 100$  (b);  $S = f(2b/H_3; q/\gamma H)$  at  $\xi_0 = 0.15$  and  $E/E_0 = 10$  (c)

ции зависимостей  $S/H_3 = f(2b/H_3)$  и  $S/H_3 = f(\xi_0)$  являются кривыми линиями, которые практически со 100%-ной достоверностью аппроксимируются полиномами второй степени, а кривые вида  $S/H_3 = f(\xi_0/\xi_0)$  с достоверностью 94 % аппроксимируются логарифмической функцией.

На рис. 3 приведены функциональные поверхности, позволяющие оценить одновременное влияние на величины осадок двух переменных расчетных параметров. Поверхность  $S/H_3 = f(E/E_0; q/\gamma H_3)$  (рис. 3a) представляет собой плоскость, что вполне ожидаемо, если иметь в виду прямолинейные графики, представленные на рис. 2a, b. Поверхности  $S = f(\xi_0; q/\gamma H)$  и  $S = f(2b/H_3; q/\gamma H)$  (рис. 3b, c) – выпуклые, причем вторая из них имеет переменную по знаку кривизну. Ответ на вопрос, почему эти поверхности не являются плоскими, заключается в том, что графические зависимости  $S/H_3 = f(2b/H_3)$ ,  $S/H_3 = f(\xi_0)$ ,  $S/H_3 = f(\xi_0/\xi_0)$  не являются линейными.

Резюмируя, можно утверждать, что все без исключения расчетные параметры оказывают существенное влияние на осадки плитного фундамента, и игнорирование хотя бы одного из них может привести к значительным ошибкам.

*Практическое использование полученных результатов.* Целью настоящей работы является получение базы данных, с помощью которой можно на начальной стадии проектирования оценить величину осадки плитного фундамента конечной жесткости без привлечения мощных вычислительных устройств. Под такой базой данных будем понимать численные значения коэффициентов линейных аппроксимаций зависимостей вида  $S/H = f(\xi_0)$ . Почему мы говорим о линейных аппроксимациях, хотя на рис. 2d показано, что эти графические зависимости с достоверностью почти 100% аппроксимируются полиномом второй степени?

На рис. 4 приведены примеры аппроксимации графических зависимостей вида  $S/H = f(\xi_0)$  при помощи полиномов первой и второй степеней. Анализ аппроксимирующих уравнений и показателей достоверности аппроксимации показывает, что достоверности этих аппроксимаций отличаются друг от друга максимум на 0.015 или 1.5 %. Принятие в виде аппроксимирующей функции полинома первой степени позволяет уменьшить требуемый объем базы данных в 1.5 раза практически без снижения точности определения осадок.

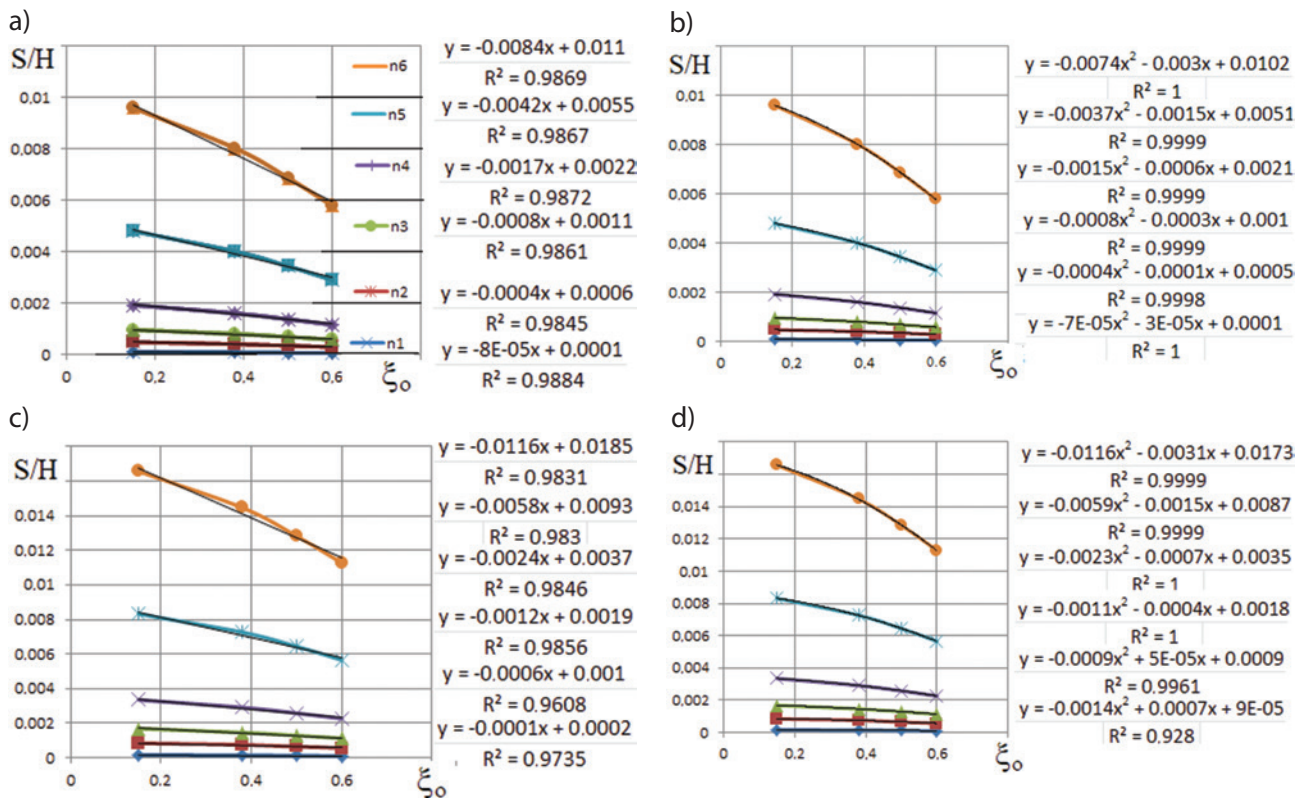


Рис. 4. Аппроксимация кривых вида  $S/H = f(\xi_0)$  полиномом первой (а, с) и второй (b, d) степени при  $q/\gamma H = 12$  и  $2b/H = 2$  (а, b),  $q/\gamma H = 20$  и  $2b/H = 20$  (с, d)  
 Fig. 4. Approximation of curves of the form  $S/H = f(\xi_0)$  by a polynomial of the first (a, c) and second (b, d) degree at  $q/\gamma H = 12$  and  $2b/H = 2$  (a, b),  $q/\gamma H = 20$  and  $2b/H = 20$  (c, d)

В таблице 2 приведены безразмерные коэффициенты  $a$  и  $b$ , используя которые, осадки протяженного плитного фундамента конечной жесткости для любых возможных сочетаний численных значений переменных расчетных параметров можно определить по формуле:

$$S/H = a\xi_0 + b. \quad (3)$$

Рассмотрим пример.

Дано: грунтовое основание сложено песком средней крупности, имеющим следующие физи-

ко-механические свойства:  $\gamma = 19.3 \text{ кН/м}^3$ ;  $\varphi = 35^\circ$ ,  $E_0 = 37 \text{ МПа}$ . Плитный фундамент имеет ширину  $2b = 3$  и  $15 \text{ м}$ , толщина плиты и глубина ее заложения  $H = 1 \text{ м}$ , материал фундамента бетон марки В15 с модулем упругости  $E = 24000 \text{ МПа}$  и коэффициентом Пуассона  $\nu = 0.2$  (СП 63.13330.2018<sup>2</sup>). Коэффициент бокового давления грунта  $\xi_0 = 0.271$  определен по формуле В. А. Флорина [23], как это рекомендовано в работах [24–28]:

$$\xi_0 = \text{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right). \quad (4)$$

<sup>2</sup> Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения = Concrete and reinforced concrete structures. General provisions : СП 63.13330.2018 : утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 19 декабря 2018 г. № 832/п : введ. 20.06.2019. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082?ysclid=lmuauebwbm87891170> (дата обращения: 03.09.2023).

Таблица 2

Table 2

Численные значения коэффициентов  $a$  и  $b$  линейной аппроксимации  
 графических зависимостей вида  $S/H = f(\xi_j)$   
 Numerical values of linear approximation coefficients  $a$  and  $b$  of graphical dependencies  
 of the form  $S/H = f(\xi_j)$

$q/\gamma H$	$E/E_0$ $2b/H$	1	5	10	20	50	100	1000	
		Кoeffициент $a$							
0	2	-0.00008	-0.0004	-0.0008	-0.0016	-0.0041	-0.0081	-0.0810	
	4	-0.00008	-0.0004	-0.0008	-0.0016	-0.0041	-0.0081	-0.0809	
	6	-0.00008	-0.0004	-0.0008	-0.0016	-0.0041	-0.0082	-0.0810	
	10	-0.00008	-0.0004	-0.0008	-0.0017	-0.0041	-0.0082	-0.0818	
	20	-0.00008	-0.0004	-0.0008	-0.0017	-0.0041	-0.0083	-0.0830	
	3	2	-0.00008	-0.0004	-0.0008	-0.0015	-0.0041	<b>-0.0082</b>	<b>-0.0816</b>
		4	-0.00008	-0.0004	-0.0008	-0.0017	-0.0041	<b>-0.0081</b>	<b>-0.0821</b>
		6	-0.00008	-0.0004	-0.0008	-0.0017	-0.0042	-0.0084	-0.0841
		10	-0.00008	-0.0004	-0.0009	-0.0017	-0.0042	-0.0084	-0.0847
		20	-0.00009	-0.0004	-0.0009	-0.0018	-0.0044	-0.0088	-0.0882
	12	2	-0.00008	-0.0004	-0.0008	-0.0017	-0.0042	<b>-0.0084</b>	<b>-0.0836</b>
		4	-0.00009	-0.0004	-0.0009	-0.0017	-0.0043	<b>-0.0086</b>	<b>-0.0858</b>
		6	-0.00009	-0.0004	-0.0009	-0.0018	-0.0044	-0.0088	-0.0881
		10	-0.00010	-0.0005	-0.0009	-0.0019	-0.0046	<b>-0.0092</b>	<b>-0.0931</b>
		20	-0.00010	-0.0005	-0.0011	-0.0021	-0.0052	<b>-0.0103</b>	<b>-0.1038</b>
	20	2	-0.00009	-0.0004	-0.0009	-0.0017	-0.0043	-0.0086	-0.0854
		4	-0.00009	-0.0005	-0.0009	-0.0018	-0.0045	-0.0090	-0.0882
		6	-0.00010	-0.0005	-0.0009	-0.0019	-0.0046	-0.0093	-0.0928
		10	-0.00010	-0.0005	-0.0010	-0.0020	-0.0050	-0.0099	-0.1007
		20	-0.00030	-0.0006	-0.0012	-0.0024	-0.0058	-0.0116	-0.1177
Кoeffициент $b$									
0	2	0.0001	0.0005	0.0020	0.0020	0.0050	0.0101	0.1003	
	4	0.0001	0.0005	0.0020	0.0020	0.0051	0.0101	0.1008	
	6	0.0001	0.0005	0.0020	0.0020	0.0051	0.0102	0.1013	
	10	0.0001	0.0005	0.0021	0.0021	0.0051	0.0102	0.1021	
	20	0.0001	0.0005	0.0021	0.0021	0.0052	0.0104	0.1036	
	3	2	0.0001	0.0005	0.0020	0.0020	0.0051	<b>0.0103</b>	<b>0.1026</b>
		4	0.0001	0.0005	0.0021	0.0021	0.0053	<b>0.0105</b>	<b>0.1048</b>
		6	0.0001	0.0005	0.0021	0.0021	0.0052	0.0104	0.1072
		10	0.0001	0.0006	0.0022	0.0022	0.0055	0.0110	0.1095
		20	0.0001	0.0006	0.0023	0.0023	0.0058	0.0116	0.1151
	12	2	0.0001	0.0006	0.0022	0.0022	0.0055	<b>0.0110</b>	<b>0.1097</b>
		4	0.0001	0.0006	0.0024	0.0024	0.0059	<b>0.0117</b>	<b>0.1167</b>
		6	0.0001	0.0006	0.0025	0.0025	0.0062	0.0123	0.1224
		10	0.0001	0.0007	0.0027	0.0027	0.0067	<b>0.0134</b>	<b>0.1318</b>
		20	0.0002	0.0008	0.0031	0.0031	0.0077	<b>0.0153</b>	<b>0.1496</b>
	20	2	0.0001	0.0006	0.0023	0.0023	0.0058	0.0116	0.1159
		4	0.0001	0.0007	0.0026	0.0026	0.0064	0.0128	0.1270
		6	0.0001	0.0007	0.0028	0.0028	0.0069	0.0138	0.1365
		10	0.0002	0.0008	0.0031	0.0031	0.0078	0.0155	0.1517
		20	0.0002	0.001	0.0037	0.0037	0.0093	0.0185	0.1802

Интенсивность равномерно распределенной нагрузки  $q/\gamma H = 5$  и  $q/\gamma H = 12$  соответственно для фундаментов шириной 3 и 15 м.

*Определить:* осадки середины протяженных плитных фундаментов шириной 3 и 15 м.

Для того чтобы воспользоваться формулой (3), необходимо на основании данных таблицы 2 определить методом линейной интерполяции численные значения коэффициентов  $a$  и  $b$ , соответствующих численным значениям расчетных параметров, заданных выше.

Исходные коэффициенты для интерполяционного процесса выделены подчеркиванием в таблице 2. Последовательно выполняя операции интерполяции, получим искомые коэффициенты для протяженной фундаментной плиты шириной 3 м:  $a_3 = -0.054148$ ;  $b_3 = 0.686831$ , и для плиты шириной 15 м:  $a_{15} = -0.063857$ ;  $b_{15} = 0.091424$ .

Подставляя эти значения в формулу (3) и имея в виду, что  $\xi_o = 0.271$ , получим:  $S_3/H = 0.054009$  и  $S_{15}/H = 0.074118$ .

Для контроля достоверности полученных результатов составлены расчетные схемы МКЭ для обозначенных выше вариантов, и при помощи компьютерной программы [19] проведены вычисления осадок. В результате оказалось, что полученные значения контрольных осадок соответственно равны  $S/H_3^{\text{конт}} = 0.061295$  и  $S/H_{15}^{\text{конт}} = 0.089048$ , то есть отличаются на 13.45 и 22.08 % от численных значений осадок, полученных при помощи таблицы 2 и метода линейной интерполяции.

На рис. 5 приведены скриншоты экрана компьютера с результатами вычислений при помощи компьютерной программы [19] для фундамента шириной  $2b = 3$  м (рис. 5а) и  $2b = 15$  м (рис. 5б).

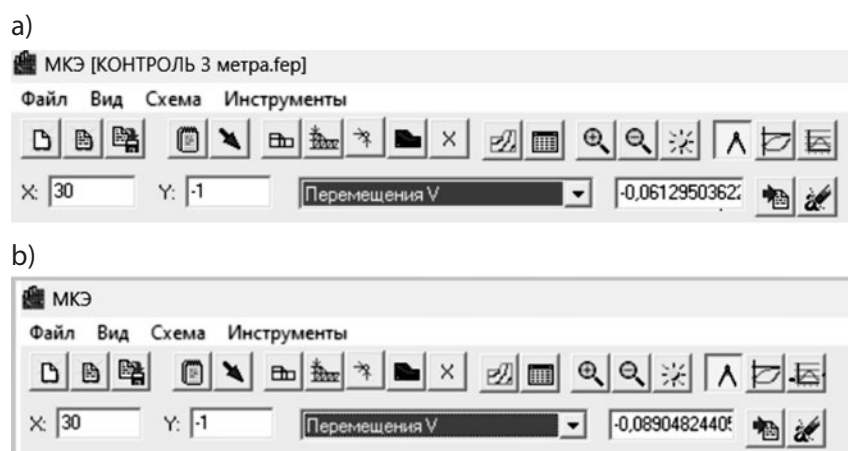


Рис. 5. Скриншоты с результатами вычислений при помощи FEA для фундамента шириной  $2b = 3$  м (а) и  $2b = 15$  м (б)

Fig. 5. Screenshots with the results of calculations using FEA for foundation of  $2b = 3$  m (a) and  $2b = 15$  m (b)

Использование предложенной базы данных (таблица 2) и алгоритма вычисления осадок позволяют получить результаты, которые с достаточной для инженерных целей точностью совпадают с результатами, получаемыми непосредственно при помощи компьютерных программ.

### Выводы

Анализируя результаты численного исследования процесса осадок протяженного плитного

фундамента, выполненного на основе применения МКЭ, можно сделать следующие выводы:

1. Осадки протяженного плитного фундамента конечной жесткости зависят от большого количества факторов, как то: интенсивности внешнего воздействия, отношения ширины фундамента к глубине его заложения и отношения модулей деформации материала фундамента и грунта основания, коэффициента бокового давления грунта и так далее. Игнорирование хотя бы одного из них может

привести к значительным ошибкам. Поэтому расчеты осадок следует выполнять на основе численных методов с тщательной обработкой граничных условий.

2. Предложена база данных, которая позволяет на ранней стадии проектирования быстро оценить величину осадки таких фундаментов.
3. Контрольный расчет, выполненный при помощи компьютерной программы FEA, по-

казал, что величины контрольных осадок отличаются на 13.45 и 22.08 % от соответствующих значений, полученных на основе предложенной базы данных и метода линейной интерполяции. Это позволяет рекомендовать полученные результаты для предварительной оценки протяженных плитных фундаментов при реальном проектировании.

### Библиографический список

1. Matvienko, J. O. Formula of the design resistance of soil for plate foundations / J. O. Matvienko, V. P. Dyba, M. P. Matvienko. – DOI 10.15593/2224-9826/2021.3.04. – Текст : непосредственный // Construction and Geotechnics. – 2020. – Vol. 12, No. 3. – P. 37–45.
2. Компьютерное моделирование осадок жесткого штампа на однородном весоном основании / Л. А. Бартоломей, О. А. Богомолова, В. Д. Гейдт, А. В. Гейдт. – DOI 10.15593/2224-9826/2022.2.01. – Текст : непосредственный // Construction and Geotechnics. – 2022. – Т. 13, № 2. – С. 5–17.
3. Компьютерное моделирование осадок штампа на однородном основании с учетом жесткости надфундаментной конструкции / Л. А. Бартоломей, О. А. Богомолова, В. Д. Гейдт, А. В. Гейдт. – Текст : непосредственный // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении : Материалы научно-технической конференции, Новочеркасск, 28–30 сентября 2022 года. – Новочеркасск : ООО «Лик», 2022. – С. 124–138.
4. Скворцов, К. Д. Оптимизация формулы расчетного сопротивления грунта / К. Д. Скворцов, А. И. Осокин. – DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-5-117-122. – Текст : непосредственный // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 5 (82). – С. 117–122.
5. Сопоставление результатов расчета несущей способности двухслойного основания заглубленного ленточного фундамента различными способами / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, А. И. Вайнгольц, О. В. Ермаков. – Текст : непосредственный // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 2. – С. 106–116.
6. Van Baars, S. Numerical check of the Meyerhof bearing capacity equation for shallow foundations / Stefan Van Baars. – DOI 10.1007/s41062-017-0116-1. – Текст : непосредственный // Innovative Infrastructure Solutions. – 2017. – Vol. 3, No. 1 – P. 1–13.
7. Пилягин, А. В. Определение расчетного сопротивления оснований при различных схемах загрузки / А. В. Пилягин. – Текст : непосредственный // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1998. – № 4-5. – С. 28–31.
8. Пилягин, А. В. К вопросу определения расчетного сопротивления оснований при различных схемах загрузки / Пилягин А. В. – Текст : непосредственный // Известия Казанской государственной архитектурно-строительной академии. – 2004. – № 1 (2). – С. 43–44.
9. Prandtl, L. Über die Härte plastischer Körper / L. Prandtl. – Текст : непосредственный // Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematisch-physikalische Klasse. – 1920. – K. 1. – P. 74–85.
10. Reissner, H. J. Zum Erddruckproblem / H. J. Reissner ; Biezeno, C. B. and Burgers, J. M. (eds.). – Текст : непосредственный // Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Congress for Applied Mechanics. – Delft, the Netherlands. – 1924. – P. 295–311.

11. Гольдштейн, М. Н. Расчеты осадок и прочности оснований зданий и сооружений / М. Н. Гольдштейн, С. Г. Кушнер, М. И. Шевченко. – Текст : непосредственный // Киев : Будівельник, 1977. – 208 с.
12. Van Baars, S. Failure mechanisms and corresponding shape factors of shallow foundations / S. Van Baars. – Текст : непосредственный // 4<sup>th</sup> Int. Conf. on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Nicosia, 2016. – Nicosia, North Cyprus, 2016. – P. 551–558.
13. Van Baars, S. The influence of superposition and eccentric loading on the bearing capacity of shallow foundations / S. Van Baars. – Текст : непосредственный // Journal of Computations and Materials in Civil Engineering. – 2016. – Vol. 1, No. 3. – P. 121–131.
14. Vesić, A. S. Analysis of ultimate loads of shallow foundations / A. S. Vesić. – Текст : непосредственный // Journal of the soil mechanics and foundations division. – 1973. – Vol. 99. – P. 45–71.
15. Vesić, A. S. Bearing capacity of shallow foundations / A. S. Vesić. – Текст : непосредственный // Foundation Engineering Handbook / H. F. Winterkorn, H. Y. Fan (eds.). – New York ; Cincinnati ; Atlanta ; Dallas ; San Francisco ; London ; Toronto ; Melbourne : Van Nostrand Reinhold Company, 1975. – P. 121–147.
16. Zhu, M. Shape Factors for Limit Loads on Square and Rectangular Footings / M. Zhu, R. L. Michalowski. – DOI 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(223). – Текст : непосредственный // Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. – 2005. – No. 131. – P. 223–231.
17. Предложения о подходе к расчету оснований сооружений / А. Н. Богомолов, А. Н. Ушаков, О. А. Богомолова, С. И. Шиян. – Текст : непосредственный // Юбилейная конференция, посвященная 80-летию кафедры механики грунтов, оснований и фундаментов, 110-летию со дня рождения Н. А. Цытовича, 100-летию со дня рождения С. С. Вялова, Москва, 30 сентября – 01 октября 2010 года. – Москва : Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2010. – С. 147–151.
18. Численное определение величины расчетного сопротивления основания под штампом конечной жесткости с учетом жесткости надфундаментной конструкции / Л. А. Бартоломей, О. А. Богомолова, В. Д. Гейдт, А. В. Гейдт. – DOI 10.15593/2224-9826/2023.2.07. – Текст : непосредственный // Construction and Geotechnics. – 2023. – Т. 14, № 2. – С. 92–104.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617889 Российская Федерация. FEA : № 2015614310 : заявл. 25.05.2015 : опублик. 23.07.2015 / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, А. В. Редин, А. Н. Ушаков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет» (ВолГАСУ). – Текст : непосредственный.
20. Zienkiewicz, O. C. The finite element method in engineering science / O. C. Zienkiewicz. – London : McGraw-Hill, 1971. – 531 p. – Текст : непосредственный.
21. Метод конечных элементов в статике сооружений / Я. Шмельтер, М. Дацко, С. Добровичский, М. Вечорек ; пер. с польского М. В. Предтеченского; под ред. В. Н. Сидорова. – Москва : Стройиздат, 1986. – 220 с. – Текст : непосредственный.
22. Назначение размеров расчетных схем при компьютерном моделировании напряженного состояния основания плитного фундамента на основе метода конечных элементов / Л. А. Бартоломей, О. А. Богомолова, В. Д. Гейдт, А. В. Гейдт. – Текст : непосредственный // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2023. – № 2 (91). – С. 5–17.
23. Флорин, В. А. Основы механики грунтов : в 2 т. / В. А. Флорин. – Ленинград : Госстройиздат, 1959–1961. Т. 1: Общие зависимости и напряженное состояние оснований сооружений. – 1959. – 357 с. – Текст : непосредственный.
24. Коэффициент бокового давления грунта как одна из величин, определяющих несущую способность однородного основания ленточного фундамента / А. Н. Богомолов, С. А. Калиновский,

- О. А. Богомоллова, А. В. Прокопенко. – Текст : непосредственный // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – № 31-2 (50). – С. 251–257.
25. Богомоллов, А. Н. К вопросу о минимальных значениях коэффициента бокового давления грунтов / А. Н. Богомоллов, О. А. Вихарева, С. И. Шиян. – Текст : непосредственный // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2007. – № 7 (26). – С. 6–10.
26. Ляшенко, П. А. Метод определения коэффициента бокового давления грунтов / П. А. Ляшенко, В. В. Денисенко. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов : Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Института строительства и архитектуры ПГТУ, Йошкар-Ола, 15 мая 2019 года. – Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2019. – С. 85–90.
27. Рекомендации по методам определения коэффициентов бокового давления и поперечного расширения глинистых грунтов / НИИ оснований и подзем. сооружений им. Н. М. Герсеванова. – Москва : НИИОСП, 1978. – 30 с. – Текст : непосредственный.
28. Нуждин, Л. В. Практический метод расчета осадок фундаментов с учетом деформационной анизотропии грунтов основания / Л. В. Нуждин, О. А. Коробова, М. Л. Нуждин. – Текст : непосредственный // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 4. – С. 245–263.

#### References

1. Matvienko, J. O., Dyba, V. P., & Matvienko, M. P. (2020). Formula of the design resistance of soil for plate foundations. *Construction and Geotechnics*, 12(3), pp. 37-45. (In English). DOI 10.15593/2224-9826/2021.3.04.
2. Bartolomey, L. A., Bogomolova, O. A., Geidt, V. D., & Geidt, A. V. (2022). Computer simulation of rigid plate settlement on a homogeneous weight base. *Construction and Geotechnics*, 13(2), pp. 5-17. (In Russian). DOI 10.15593/2224-9826/2022.2.01.
3. Bartolomey, L. A., Bogomolova, O. A., Geidt, V. D., & Geidt, A. V. (2022). Computer simulation of the stamp sediment on a homogeneous base taking into account the rigidity of the foundation structure. *Mekhanika gruntov v geotekhnike i fundamentostroenii : Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, Novocherkassk, September, 28–30. Novocherkassk, ООО "Lik" Publ., pp. 144-138. (In Russian).
4. Skvortsov, K. D., & Osokin, A. I. (2020). Optimization of the formula of the design resistance of soil. *Bulletin of civil engineers*, (5(82)), pp. 117-122. (In Russian). DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-5-117-122.
5. Bogomolov, A. N., Bogomolova, O. A., Vaingolts, A. I., & Yermakov, O. V. (2014). The comparison of the results of calculation of the bearing capacity of two-layer basis of deep strip foundations in different ways. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, (2), 106-116. (In Russian).
6. Van Baars, S. (2017). Numerical check of the Meyerhof bearing capacity equation for shallow foundations. *Innovative Infrastructure Solutions*, 3(1), pp. 1-13. (In English). DOI 10.1007/s41062-017-0116-1.
7. Pilyagin, A. V. (1998). Opredelenie raschetnogo soprotivleniya osnovaniy pri razlichnykh skhemakh zagruzheniya. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (4-5), pp. 28-31. (In Russian).
8. Pilyagin, A. V. (2004). K voprosu opredeleniya raschetnogo soprotivleniya osnovaniy pri razlichnykh skhemakh zagruzheniya. *Izvestiya Kazanskoy gosudarstvennoy arkhitekturno-stroitel'noy akademii*, (1(2)), pp. 43-44. (In Russian).

9. Prandtl, L. (1920). About the hardness of plastic bodies [Über die Härte plastischer Körper]. News from the Royal society of scientists in Göttingen. Maths and physics class [Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematisch-physikalische Klasse], (1), pp. 74-85. (In German).
10. Reissner, H. J. (1924). The Earth pressure problem [Zum Erddruckproblem]. Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Congress for Applied Mechanics. Biezeno, C. B., & Burgers, J. M. (eds.). Delft, the Netherlands, pp. 295-311. (In German).
11. Gol'dshteyn, M. N., Kushner, S. G., & Shevchenko, M. I. (1977). Rascheti osadok i prochnosti osnovaniy zdaniy i sooruzheniy. Kyiv, Budivel'nik Publ., 208 p. (In Russian).
12. Van Baars, S. (2016). Failure mechanisms and corresponding shape factors of shallow foundations. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Nicosia, 2016. Nicosia, North Cyprus, Publ. Near East University, pp. 551-558. (In English).
13. Van Baars, S. (2016). The influence of superposition and eccentric loading on the bearing capacity of shallow foundations. Journal of Computations and Materials in Civil Engineering, 1(3), pp. 121-131. (In English).
14. Vesić, A. S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. Journal of the soil mechanics and foundations division, 99, pp. 45-71. (In English).
15. Vesić, A. S. (1975). Bearing capacity of shallow foundations. Foundation Engineering Handbook. H. F. Winterkorn, H. Y. Fan (eds.). New York, Cincinnati, Atlanta, Dallas, San Francisco, London, Toronto, Melbourne, Publ. Van Nostrand Reinhold Company, pp. 121-147. (In English).
16. Zhu, M., & Michalowski, R. L. (2005). Shape factors for limit loads on square and rectangular footings. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, (131), pp. 223-231. DOI 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(223). (In English).
17. Bogomolov, A. N., Ushakov, A. N., Bogomolova, O. A., & Shiyan, S. I. (2010). Predlozheniya o podhode k raschetu osnovaniy sooruzheniy. Jubilejnaya konferenciya, posvjashhennaya 80-letiju kafedry mehaniki gruntov, osnovaniy i fundamentov, 110-letiju so dnja rozhdeniya N. A. Cytovicha, 100-letiju so dnja rozhdeniya S. S. Vjalova, Moscow, September, 30 – October, 01. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publ., pp. 147-151. (In Russian).
18. Bartolomey, L. A., Bogomolova, O. A., Geidt, V. D., & Geidt, A. V. (2023). Numerical determination of the value of the calculated resistance of the base under the stamp of final stiffness, taking into account the rigidity over the foundation structure. Construction and Geotechnics, 14(2), pp. 92-104. (In Russian). DOI 10.15593/2224-9826/2023.2.07.
19. Bogomolov, A. N., Bogomolova, O. A., Redin, A. V., & Ushakov, A. N. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2015617889 Rossijskaja Federaciya. FEA. Applied: 25.05.2015. Published: 23.07.201. (In Russian).
20. Zienkiewicz, O. C. (1971). The finite element method in engineering science. London, Publ. McGraw-Hill, 531 p. (In English).
21. Shmel'ter, Ja., Dacko, M., Dobrochinskij, S., & Vechorek, M. (1986). Metod konechnyh jelementov v statike sooruzhenij. Moscow, Stroyizdat Publ., 220 p. (In Russian).
22. Bartolomey, L. A., Bogomolova, O. A., Geidt, V. D., & Geidt, A. V. (2023). Assignment of the dimensions of the calculation schemes in computer simulation of the stress state of the plate foundation base based on the finite element method. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura, (2(91)), pp. 5-17. (In Russian).
23. Florin, V. A. (1959). Obshchie zavisimosti i napryazhennoe sostoyanie osnovaniy sooruzheniy, Vol. 1. Leningrad, Gosstroyizdat Publ., 357 p. (In Russian).



24. Bogomolov, A. N., Kalinovskiy, S. A., Bogomolova, O. A., & Prokopenko, A. V. (2013). Coefficient of lateral earth pressure as one of values that determine bearing capacity of entire base of strip foundation. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura, (31-2(50)), pp. 251-257. (In Russian).
25. Bogomolov, A. N., Vikhareva, O. A., & Shiyan, S. I. (2007). On the issue of minimal coefficient values of lateral earth pressure. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura, (7(26)), pp. 6-10. (In Russian).
26. Lyashenko, P. A., & Denisenko, V. V. (2019). Metod opredeleniya koeffitsienta bokovogo davleniya gruntov. Aktual'nye problemy stroitel'nogo i dorozhnogo kompleksov : Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchenoy 50-letiyu Instituta stroitel'stva i arkhitektury PGTU, Yoshkar-Ola, May, 15. Yoshkar-Ola : Volga state university of technology, pp. 85-90. (In Russian).
27. Rekomendatsii po metodam opredeleniya koeffitsientov bokovogo davleniya i poperechnogo rasshireniya glinistykh gruntov. Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP). Moscow, NIIOSP Publ., 30p. (In Russian).
28. Nuzhdin, L. V., Korobova, O. A., & Nuzhdin, M. L. (2014). Prakticheskiy metod rascheta osadok fundamentov s uchetom deformatsionnoy anizotropii gruntov osnovaniya. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura, (4), pp. 245-263. (In Russian).

#### **Сведения об авторах**

Бартоломей Леонид Адольфович, д-р техн. наук, профессор кафедры строительного производства, Тюменский индустриальный университет, ORCID: 0000-0001-8092-6476

Богомолова Оксана Александровна, канд. техн. наук, доцент кафедры математических и естественно-научных дисциплин, Волгоградский государственный технический университет, e-mail: boazaritcyn@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1163-6285

Гейдт Лариса Викторовна, старший преподаватель кафедры строительного производства, Тюменский индустриальный университет, e-mail: gejdltv@tyuiu.ru, ORCID: 0000-0002-1616-454X

Гейдт Андрей Владимирович, аспирант кафедры строительного производства, Тюменский индустриальный университет, e-mail: andreygeydt@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2649-6927

#### **Information about the authors**

Leonid A. Bartolomey, Doctor in Engineering, Professor at the Department of Building Production, Industrial University of Tyumen, ORCID: 0000-0001-8092-6476

Oksana A. Bogomolova, Candidate in Engineering, Associate Professor at the Department of Mathematical and Natural Science Disciplines, Volgograd State Technical University, e-mail: boazaritcyn@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1163-6285

Larisa V. Geidt, Senior Lecturer at the Department of Building Production, Industrial University of Tyumen, e-mail: gejdltv@tyuiu.ru, ORCID: 0000-0002-1616-454X

Andrei V. Geidt, Postgraduate Student at the Department of Building Production, Industrial University of Tyumen, e-mail: andreygeydt@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2649-6927

*Получена 23 августа 2023 г., одобрена 18 сентября 2023 г., принята к публикации 28 сентября 2023 г.  
Received 23 August 2023, Approved 18 September 2023, Accepted for publication 28 September 2023*

# ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ПОДЗЕМНОГО И НАДЗЕМНОГО НЕФТЕПРОВОДА

И. О. Разов, В. Г. Соколов, А. В. Дмитриев, А. В. Березнев  
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

## PARAMETRIC FLUCTUATIONS OF UNDERGROUND AND ELEVATED OIL PIPELINE

Igor O. Razov, Vladimir G. Sokolov, Andrey V. Dmitriev, Alexey V. Bereznev  
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Аннотация.** Исходя из основных положений и допущений полубезмоментной теории замкнутых цилиндрических оболочек, получен аналитический метод исследования динамической неустойчивости трубопроводов. В качестве источника возбуждения рассматривается нестационарное внутреннее давление, вызванное насосным оборудованием перекачивающих станций, которое, в свою очередь, приводит к возбуждению продольную сжимающую силу, реакцию упругого отпора грунта, а также скорость протекающей жидкости. Результатом предложенного метода являются неравенства, учитывающие демпфирующие свойства грунтовой среды и перечисленные выше факторы. Посредством этих неравенств определяются верхняя и нижняя границы области в зависимости от частоты возбуждения насосной станции, а оценка потери устойчивости сводится к определению значения собственной частоты трубопровода. Если точка попадает в построенную область, то появление параметрического резонанса неизбежно. Сравнение областей неустойчивости для наземной и подземной про-

**Abstract.** Based on the use of the assumptions of the theory of closed cylindrical shells by Vasilii Z. Vlasov, the authors suggested an analytical method for the study of dynamic instability of pipelines. The nonstationary internal pressure induced by the pumping equipment of the pumping stations is considered as the stimulation source. This pressure excites the longitudinal compressive force, the elastic soil resistance reaction, and the velocity of the flowing fluid. The result of the proposed method is inequalities that take into account the damping properties of the ground and the above factors. By means of these inequalities, it can be determined the upper and lower limits of the region depending on the excitation frequency of the pumping station. And the estimation of the stability loss is reduced to the determination of the value of the natural pipeline frequency. If a point falls into the constructed region, the appearance of parametric resonance is inevitable. Comparison of the instability areas for elevated and underground installation depending on the longitudinal force parameter showed that the shift of the area for the

кладки в зависимости от параметра продольной силы показало, что смещение области для подземного способа происходит в сторону увеличения параметра продольной силы.

**Ключевые слова:** параметрический резонанс, частота собственных колебаний, подземный и наземный трубопровод большого диаметра, тонкостенная цилиндрическая оболочка

**Для цитирования:** Параметрические колебания подземного и наземного нефтепровода / И. О. Разов, В. Г. Соколов, А. В. Дмитриев, А. В. Березнев. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-48-60. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 3 (105). – С. 48–60.

**For citation:** Razov, I. O., Sokolov, V. G., Dmitriev, A. V., & Bereznev, A. V. (2023). Parametric fluctuations of underground and elevated oil pipeline. *Architecture, Construction, Transport*, (3(105)), pp. 48-60. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-48-60.

## Введение

Переориентация рынка сбыта и повышение объемов транспортировки нефти по магистральным трубопроводам приводят к увеличению диаметра данных сооружений. В настоящее время он составляет не менее 1 200 мм, а толщина стенки 30–40 мм. Согласно классификации, такие трубопроводы относятся к тонкостенным. Для обеспечения надежной эксплуатации этих линейных сооружений необходимо выполнять не только статические, но и динамические расчеты. Целью последних является определение спектра собственных частот по низшим 3-5 гармоникам, для тонкостенного трубопровода большого диаметра они приводятся во множестве открытых источников. При оценке вероятности возникновения простого резонанса следует исключать совпадение собственных частот с частотой возбуждения. Однако существует явление, называемое параметрическим резонансом, которое намного опаснее простого, так как для его появления необязательно четкое совпадение частоты возбуждения с собственной частотой колебаний конструкции. Разница между этими значениями может быть 2- или даже 3-кратная.

Для изучения параметрического резонанса трубопроводов применяют различные подходы, например, в [1] исследование построено на спек-

trical method is towards the increase of the longitudinal force parameter.

**Key words:** parametric resonance, natural oscillation frequency, large-diameter underground and elevated pipeline, thin-walled cylindrical shell

тральном анализе участков трубопроводов, подверженных сейсмическому воздействию. В [2] задача по изучению динамической неустойчивости решается с помощью численного моделирования. В [3–6] трубопровод рассматривается с позиции стержневой теории, данная теория не учитывает эффект Кармана (деформацию поперечного сечения) и лишь отдаленно характеризует работу тонкостенного трубопровода большого диаметра. В источнике [7] рассматриваются заглубленные плавучие трубопроводные системы тоже с позиции стержневой теории, а в качестве источников возбуждения учитываются вихревые потоки. Нелинейный подход при анализе параметрических колебаний для трубопроводов без учета окружающей среды осуществлен в работах [8, 9]. С позиции оболочечной теории (без учета сил сопротивления среды) вопрос параметрических колебаний в [10, 11] исследуется для прямолинейного трубопровода, в [12] для криволинейных.

Данная работа посвящена решению задачи о параметрическом резонансе для тонкостенных труб (цилиндрических оболочек), уложенных в грунтовой среде (с учетом сил сопротивления среде) при нестационарном давлении в трубопроводе, которое приводит к возбуждению продольную сжимающую силу, реакцию упругого отпора грунта, а также скорость протекающей жидкости.

### Объект и методы исследования

Рассматривается подземный участок трубопровода, который подвергается действию нестационарного внутреннего давления, возникающего при запуске или нестационарной работе оборудования насосных станций для перекачки нефти:

$$P(t) = P_0 (1 + \delta_{mn} \cos \omega_0 t), \quad (1)$$

где  $P_0$  – внутреннее давление;

$\omega_0$  – частота работы насосного оборудования при пуске,

$\delta_{mn} \leq 0,5$  – коэффициент возбуждения.

Внутреннее давление приводит к возбуждению скорости потока нефти, описываемую функцией:

$$V(t) = V_0 (1 + \delta_{mn} \cos \omega_0 t), \quad (2)$$

продольную силу, которая описывается функцией:

$$F(t) = F (1 + \delta_{mn} \cos \omega_0 t), \quad (3)$$

а также коэффициент упругого отпора грунта:

$$k(t) = k (1 + \delta_{mn} \cos \omega_0 t). \quad (4)$$

Для решения поставленной задачи в отношении подземного нефтепровода используем полученное ранее в работе [13] дифференциальное уравнение движения в перемещениях:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^3 u}{\partial \xi^3} + h_v^2 \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} \left( \frac{\partial^2 g_2}{\partial \theta^2} + g_2 \right) + 2 \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \varepsilon_0 \right) - \\ & - \frac{R}{Eh} p_0 \frac{\partial^3 g_2}{\partial \theta^3} + \frac{R \mu_{bj}}{Eh} \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^2 \partial t^2} + \frac{R^2}{Eh} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - \\ & - \frac{R^2 \rho}{Eh} \left( \frac{\partial^3 u}{\partial \xi \partial t^2} - \frac{\partial^3 v}{\partial \xi \partial t^2} - \frac{\partial^3 w}{\partial \theta^2 \partial t} \right) + \\ & + \frac{R \gamma H}{Eh} \frac{\partial^3 g_2}{\partial \theta^3} (2 - \alpha_1 \cos \theta - 2 \alpha_2 \cos 2\theta) + \\ & + \frac{R \gamma H}{Eh} \left( \frac{\partial^2 g_2}{\partial \theta^2} \alpha_1 \sin \theta + \frac{\partial^2 g_2}{\partial \theta^2} 2 \alpha_2 \sin 2\theta \right) + \\ & + \frac{R \gamma H}{Eh} \left( \frac{\partial g_2}{\partial \theta} \alpha_1 \cos \theta - \frac{\partial g_2}{\partial \theta} 4 \alpha_2 \cos 2\theta \right) + \\ & + \rho_0 \Phi_{mn} \frac{R}{Eh} \left( R^2 \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^2 \partial t^2} + V_0^2 \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^2 \partial \xi^2} \right) = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

где  $u, v, w$  – перемещения в продольном окружном и радиальном направлениях, отнесенные к радиусу трубопровода  $R$ ,

$\xi = \frac{x}{L}$  – продольная координата,  
 $\theta$  – полярный угол,

$g_2$  – угол поворота касательной исходного и деформированного состояния,

$E$  – модуль упругости материала трубы,

$\rho$  – плотность материала оболочки,  $H \cdot c^2 / M^4$ ,

$\varepsilon_0$  – исходная деформация прямолинейного участка цилиндрической оболочки для недеформируемого контура поперечного сечения,

$k = \frac{E_0}{R(1 + \nu_0)}$  – коэффициент упругого отпора грунта,

$\nu_0$  – коэффициент Пуассона грунта,

$E_0$  – модуль упругости грунта,  $H / M^2$ ,

$\gamma$  – плотность грунта,  $H / M^3$ ,

$H$  – глубина заложения трубопровода,  $m$ ,

$\rho_0$  – плотность протекающей жидкости,  $H \cdot c^2 / M^4$ ,

$V_0$  – скорость протекающей жидкости,  $m/c$ ,

$\rho_0 \Phi_{mn}$  – присоединенная масса жидкости,

$h_v = \frac{h}{R\sqrt{12(1 - \nu^2)}}$  – параметр относительной толщины оболочки, величина безразмерная,

$\nu$  – коэффициент Пуассона материала оболочки.

Уравнение (5) содержит 4 неизвестных ( $u, v, w$  и  $g_2$ ). Присоединив к нему соотношения полубезмоментной теории оболочек, которые описываются выражениями (6):

$$\frac{\partial v}{\partial \theta} + w = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \theta} = 0, \quad g_2 = \frac{\partial w}{\partial \theta} - \nu, \quad (6)$$

получаем полную систему уравнений.

Решим систему (5) и (6) методом Фурье, для случая шарнирного закрепления концов рассматриваемого участка оболочки радиальное перемещение запишем в виде:

$$w(\xi, \theta, t) = \sum_m \sum_n b_{mn} \varphi(t) \sin(\lambda_0 \xi) \cos(m\theta). \quad (7)$$

Из (6) получим:

$$u = \sum_m \sum_n b_{mn} \frac{\lambda_n}{m^2} \varphi(t) \cos(\lambda_0 \xi) \cos(m\theta),$$

$$v = \sum_m \sum_n b_{mn} \frac{1}{m} \varphi(t) \sin(\lambda_0 \xi) \sin(m\theta), \quad (8)$$

$$g_2 = - \sum_m \sum_n b_{mn} \frac{m^2 - 1}{m} \varphi(t) \sin(\lambda_0 \xi) \sin(m\theta),$$

где  $\lambda_0 = \frac{n\pi R}{L}$ ,

$m, n$  – волновые числа в окружном и продольном направлениях.

В формулах (7) и (8) искомой функцией становится гармоническая функция  $\varphi(t)$ , подставив в (5) выражения (6–8) с учетом (1–4), получаем разделяющуюся систему дифференциальных уравнений движения оболочки вида:

$$\varphi''(t) + \frac{1}{\left[ \rho^* (\lambda_n^2 h_v + m^2 + m^4) + \rho_0^* \Phi_{mn} R^2 m^4 \right]} \left\{ \begin{aligned} & \lambda_n^4 + m^4 (m^2 - 1) (m^2 - 1 + p^* - 2q_{zp}^*) + k^* m^4 - \frac{\lambda_n^4 m^4 P}{n} - \rho_0^* \Phi_{mn} V_0^2 m^4 + \\ & \left[ k^* m^4 + p^* m^4 (m^2 - 1) - \frac{\lambda_n^4 m^4 P}{n} - \rho_0^* \Phi_{mn} R^2 m^4 \right] \cos \omega_0 t \end{aligned} \right\} \cdot \varphi(t) = 0. \quad (9)$$

Далее преобразуем выражение (9), сведя его к известному уравнению Матье и вынеся за скобки пять первых слагаемых при  $\varphi(t)$ :

$$\varphi''(t) + \frac{\lambda_n^4 + m^4 (m^2 - 1) (m^2 - 1 + p^* - 2q_{zp}^*) + k^* m^4 - \lambda_n^4 m^4 P / n - \lambda_n^4 \rho_0^* \Phi_{mn} V_0^2 m^4 h_v}{\rho^* (\lambda_n^2 h_v + m^2 + m^4) + \rho_0^* \Phi_{mn} R^2 m^4} \cdot \left\{ 1 - \frac{\lambda_n^4 m^4 P / n + \lambda_n^4 \rho_0^* \Phi_{mn} V_0^2 m^4 h_v - k^* m^4 - p^* m^4 (m^2 - 1)}{\lambda_n^4 + m^4 (m^2 - 1) (m^2 - 1 + p^* - 2q_{zp}^*) + k^* m^4 - \lambda_n^4 m^4 P / n - \lambda_n^4 \rho_0^* \Phi_{mn} V_0^2 m^4 h_v} \cos \omega_0 t \right\} \cdot \varphi(t) = 0. \quad (10)$$

Дифференциальное уравнение Матье при  $m, n = 1, 2, \dots$  имеет вид:

$$\varphi''(t) + \omega_{mn}^2 \{ 1 - \delta_{mn} \cos \omega_0 t \} \varphi(t) = 0, \quad (11)$$

где  $\delta_{mn}$  – коэффициент возбуждения для подземного трубопровода,

$\omega_{mn}^2$  – квадрат частоты свободных колебаний подземного участка нефтепровода, определяемый выражением, полученным в [14]:

$$\omega_{mn}^2 = \frac{\lambda_n^4 + m^4 (m^2 - 1) (m^2 - 1 + p^* - 2q_{zp}^*) + k^* m^4 - \lambda_n^4 m^4 P / n^2 - \lambda_n^4 \rho_0^* \Phi_{mn} V_0^2 m^4 h_v}{\rho^* R h (\lambda_n^2 h_v + m^2 + m^4) + \mu_b m^4 + \rho_0^* \Phi_{mn} R^2 m^4}. \quad (12)$$

В (12) введены следующие безразмерные параметры:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{\sqrt{h_v}} \quad - \text{ параметр длины трубопровода,}$$

величина безразмерная,

$$p^* = \rho_0 \left( \frac{R}{Eh \cdot h_v} \right) \quad - \text{ параметр внутреннего рабо-}$$

чего давления, величина безразмерная,

$$\rho^* = \rho \left( \frac{R}{Eh \cdot h_v} \right) \quad - \text{ параметр плотности грунта, } c^2/m^2,$$

$$\rho_0^* = \rho_0 \left( \frac{R}{Eh \cdot h_v} \right) \quad - \text{ параметр плотности материала}$$

трубопровода,  $c^2/m^2$ ,

$$k^* = \frac{R^2 k}{E_0 h \cdot h_v} \quad - \text{ приведенный коэффициент}$$

упругого отпора грунта, величина безразмерная,

$$q_{zp}^* = \frac{\gamma H R}{E_0 h \cdot h_v} \quad - \text{ параметр упругого отпора грунта,}$$

величина безразмерная;

$$P = \frac{F}{F_3} \quad - \text{ параметр продольной сжимающей силы,}$$

величина безразмерная,

$F$  – продольная сжимающая сила, Н,

$$F_3 = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad - \text{ Эйлера сила, Н,}$$

$\mu_{bj} = k_{bj} \cdot \mu_b$  – присоединенная масса грунта,

$$\mu_b = \frac{\rho_{zp} \pi R^2}{2} \quad - \text{ присоединенная масса грунта,}$$

приходящаяся на единицу длины трубопровода,

$k_{bj}$  – коэффициент присоединенной массы грунта.

Как видно из выражений (10) и (11), коэффициент возбуждения равен:

$$\delta_{mn} = \frac{\lambda_n^4 m^4 P / n + \lambda_n^4 \rho_0^* \Phi_{mn} V_0^2 m^4 h_v - k^* m^4 - p^* m^4 (m^2 - 1)}{\lambda_n^4 + m^4 (m^2 - 1) (m^2 - 1 + p^* - 2q_{zp}^*) + k^* m^4 - \lambda_n^4 m^4 P / n - \lambda_n^4 \rho_0^* \Phi_{mn} V_0^2 m^4 h_v}. \quad (13)$$

Дальнейшее решение для выражения (11) сводится к построению областей динамической неустойчивости, и производится оценка возникновения параметрического резонанса для нефтепроводов, которая заключается в определении значения собственной частоты  $\omega_0$  для рассматриваемого участка и нанесении точки на область параметров. Если точка попала в очерченную область, то возникновение параметрического резонанса составляет 100 %, а при попадании вне области динамическая устойчивость для трубопровода обеспечена.

Решение уравнения (11) для областей неустойчивости предложено Н. Н. Боголюбовым [15] и представляет собой неравенства. Для нахождения границ I области:

$$1 - \sqrt{\frac{\delta_{mn}^2}{4}} < \left( \frac{2\omega_{mn}}{\omega_0} \right)^2 < 1 + \sqrt{\frac{\delta_{mn}^2}{4}}, \quad (14)$$

II области:

$$4 + \frac{2(\delta_{mn})^2}{3} - \sqrt{\delta_{mn}^4} < \left( \frac{2\omega_{mn}}{\omega_0} \right)^2 < 4 + \frac{2(\delta_{mn})^2}{3} + \sqrt{\delta_{mn}^4}, \quad (15)$$

III области:

$$9 + \frac{81(\delta_{mn})^2}{64} - \sqrt{\frac{3^{12}(\delta_{mn})^6}{2^{18}}} < \left( \frac{2\omega_{mn}}{\omega_0} \right)^2 < 9 + \frac{81(\delta_{mn})^2}{64} + \sqrt{\frac{3^{12}(\delta_{mn})^6}{2^{18}}}. \quad (16)$$

Для подсчета значений и построения границ динамической неустойчивости воспользуемся ранее полученными решениями для наземного нефтепровода, приведенными в работе [16]:

$$\omega_{mn}^2 = \frac{\lambda_n^4 + m^4(m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^*) + k_n^* m^4 - \lambda_n^4 m^4 P / n^2 - \lambda_n^4 \rho_0^* \Phi_{mn} V^2 m^4 h_v}{\rho^* R h (\lambda_n^2 h_v + m^2 + m^4) + \rho_0^* \Phi_{mn} R^2 m^4}, \quad (17)$$

где  $k_n^* = \frac{R^2 k}{\pi E h \cdot h_v^2} \cdot z_m$ , где  $z_m$  определяется по методике [17] в зависимости от волновых чисел  $m$ .

Коэффициент возбуждения  $\delta_{mn}$  для наземного нефтепровода определяется выражением из [10]:

$$\delta_{mn} = \frac{\lambda_n^4 m^4 P / n + \lambda_n^4 \rho_0^* \Phi_{mn} V^2 m^4 h_v - k_n^* m^4 - p^* m^4 (m^2 - 1)}{\lambda_n^4 + m^4 (m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^*) + k_n^* m^4 - \lambda_n^4 m^4 P / n - \lambda_n^4 \rho_0^* \Phi_{mn} V^2 m^4 h_v}. \quad (18)$$

Основное отличие между формулами (12), (13) и (17), (18) заключается в методике учета влияния давления грунта на стенку трубопровода. Для наземных трубопроводов влияние

грунта описывается импульсной функцией [17], а для подземного трубопровода давление грунта представлено в виде неоднородного давления [13]. Определение границ областей динамической неустойчивости для наземного и подземного трубопровода представляет научный интерес, поскольку важно исследовать влияние упругого основания грунта на частоты свободных колебаний и параметрические колебания при различных способах прокладки.

При построении областей динамической неустойчивости для нахождения верхней границы используем выражение:

$$\omega_0^2 = 4\omega_{mn}^2 \left( 1 - \frac{\delta_{mn}}{2} \right)^{-1}, \quad (19)$$

для нижней:

$$\omega_0^2 = 4\omega_{mn}^2 \left( 1 + \frac{\delta_{mn}}{2} \right)^{-1}. \quad (20)$$

## Результаты и обсуждение

При использовании описанного выше метода были построены области неустойчивости для различных способов прокладки нефтепровода. Результаты представлены в таблицах 1, 2.

Анализ полученных результатов, отраженных в таблицах 1, 2 и на рис. 1, показывает, что для трубопроводов с параметром тонкостенности  $h/R = 1/30$  площадь областей уже, чем для  $h/R = 1/50$ , то есть для обеспечения динамической устойчивости трубы с большей толщиной стенки более выгодны.

Сравнение и сопоставление областей, построенных для наземного и подземного нефтепровода, показало, что области для подземных трубопроводов смещены в сторону увеличения значений  $\omega_0$ , это объясняется более значительным влиянием упругого отпора грунта на жесткость трубопровода, увеличивая ее.

Далее построим области в зависимости от изменения параметра  $P$  для подземного и наземного способа прокладки трубопровода. Результаты расчета сведены в таблицы 3 и 4.

Таблица 1

Table 1

Подземный нефтепровод. Значение частоты возмущения  $\omega_0$ , Гц, для верхней и нижней границы областей неустойчивости при различном внутреннем давлении и параметре тонкостенности  $h/R$   
 Underground oil pipeline. The value of the perturbation frequency  $\omega_0$ , Hz, for the upper and lower boundary of the instability areas at different internal pressure and thin-walled parameter  $h/R$

$h/R = 1/30; P = F/F_s = 0,1; L/R = 1/10; k = 0,5 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3, H = 2 \text{ м}$					
$p_0$ , МПа	0.9	4.0	6.0	8.0	10.0
1-я область	<u>44.09</u> 44.09	<u>63.48</u> 56.82	<u>74.82</u> 62.79	<u>85.16</u> 68.11	<u>94.66</u> 73.03
2-я область	<u>11.02</u> 11.02	<u>15.27</u> 13.72	<u>17.58</u> 14.91	<u>19.65</u> 15.96	<u>21.53</u> 16.95
$h/R = 1/40; P = F/F_s = 0,1; L/R = 1/10; k = 0,5 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3, H = 2 \text{ м}$					
$p_0$ , МПа	0.8	2.00	4.0	6.0	8.0
1-я область	<u>40.91</u> 40.91	<u>49.71</u> 44.59	<u>65.29</u> 52.75	<u>78.62</u> 59.63	<u>90.36</u> 65.76
2-я область	<u>10.11</u> 10.11	<u>11.97</u> 10.77	<u>15.12</u> 12.39	<u>17.77</u> 13.79	<u>20.08</u> 15.07
$h/R = 1/50; P = F/F_s = 0,1; L/R = 1/10; k = 0,5 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3, H = 2 \text{ м}$					
$p_0$ , МПа	0.1	2.0	4.0	6.0	8.0
1-я область	<u>29.77</u> 29.77	<u>51.37</u> 42.69	<u>68.51</u> 51.57	<u>82.75</u> 59.07	<u>95.12</u> 65.71
2-я область	<u>7.44</u> 7.43	<u>12.02</u> 10.10	<u>15.43</u> 11.91	<u>18.24</u> 13.48	<u>20.69</u> 14.89

Таблица 2

Table 2

Наземный нефтепровод. Значение частоты возмущения  $\omega_0$ , Гц, для верхней и нижней границы областей неустойчивости при различном внутреннем давлении и параметре тонкостенности  $h/R$   
 Elevated oil pipeline. The value of the perturbation frequency  $\omega_0$ , Hz, for the upper and lower boundary of the instability areas at different internal pressure and thin-walled parameter  $h/R$

$h/R = 1/30; P = F/F_s = 0,1; L/R = 1/10; k = 0,5 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3$					
$p_0$ , МПа	1.5	4.0	6.0	8.0	10.0
1-я область	<u>41.62</u> 41.62	<u>57.55</u> 53.51	<u>69.42</u> 59.98	<u>80.22</u> 65.58	<u>90.11</u> 70.66
2-я область	<u>10.44</u> 10.44	<u>14.03</u> 13.07	<u>16.49</u> 14.34	<u>18.66</u> 15.45	<u>20.63</u> 16.47
$h/R = 1/40; P = F/F_s = 0,1; L/R = 1/10; k = 0,5 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3$					
$p_0$ , МПа	0.8	2.0	4.0	6.00	8.00
1-я область	<u>30.81</u> 30.81	<u>41.12</u> 39.57	<u>58.45</u> 48.98	<u>72.34</u> 56.38	<u>84.81</u> 62.84
2-я область	<u>7.55</u> 7.55	<u>10.14</u> 9.77	<u>13.67</u> 11.64	<u>16.52</u> 13.13	<u>18.98</u> 14.46
$h/R = 1/50; P = F/F_s = 0,1; L/R = 1/10; k = 0,5 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3$					
$p_0$ , МПа	0.6	2.0	4.0	6.0	8.0
1-я область	<u>30.03</u> 30.03	<u>41.41</u> 37.41	<u>60.59</u> 47.46	<u>76.08</u> 55.53	<u>89.27</u> 62.54
2-я область	<u>7.51</u> 7.48	<u>10.01</u> 9.05	<u>13.87</u> 11.07	<u>16.93</u> 12.73	<u>19.53</u> 14.22

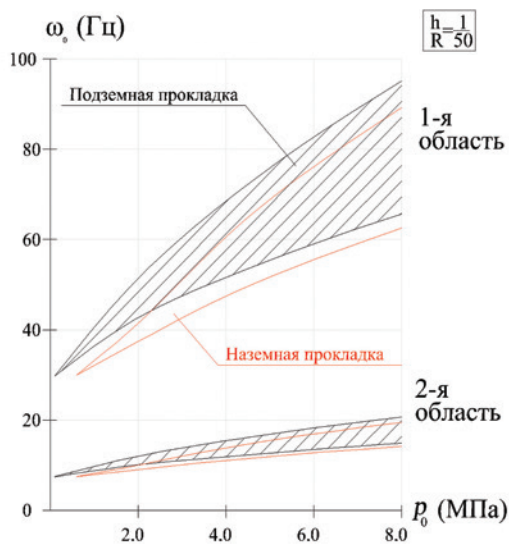
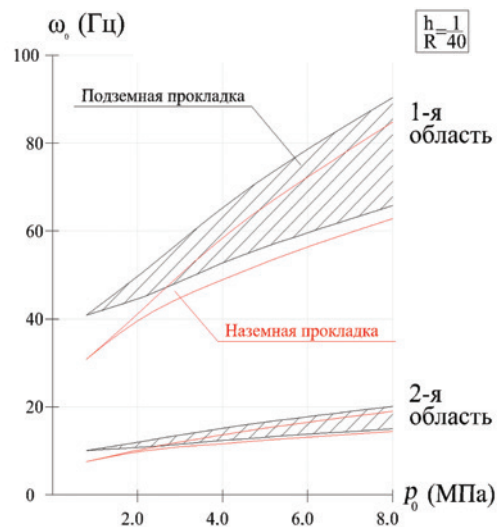
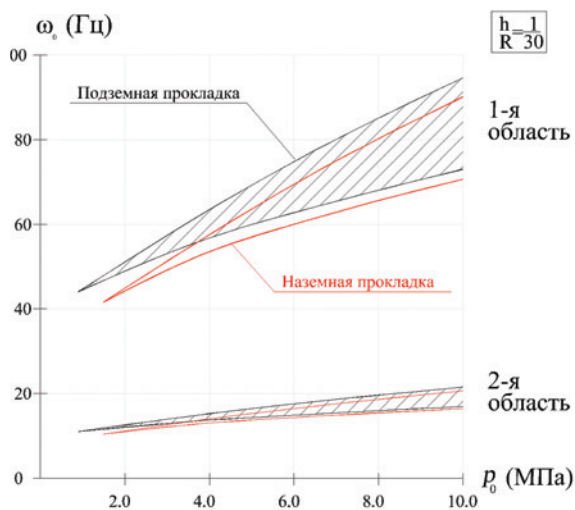


Рис. 1. Области динамической неустойчивости для подземного и наземного нефтепровода в зависимости от изменения внутреннего давления  
 Fig. 1. Dynamic instability zones for underground and elevated oil pipeline as a function of internal pressure variation

Таблица 3  
 Table 3

Подземный нефтепровод.  
 Значение частоты возмущения  $\omega_0$ , Гц, для верхней и нижней границы областей неустойчивости в зависимости от параметра продольной силы  
 Underground oil pipeline. The value of the perturbation frequency  $\omega_0$ , Hz, for the upper and lower boundary of the instability areas depending on the longitudinal force parameter

	$h/R = 1/40; p_0 = 3.0 \text{ МПа}; L/R = 1/10; k = 0.5 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3, H = 2 \text{ м}$						
$P = F/F_3$	0.261	0.275	0.285	0.30	0.312	0.325	0,35
1-я область	<u>34.44</u> 34.44	<u>33.19</u> 32.99	<u>31.36</u> 30.09	<u>30.28</u> 26.26	<u>30.95</u> 22.24	<u>38.04</u> 16.69	= 4,68
2-я область	<u>8.61</u> 8.61	<u>8.28</u> 8.23	<u>7.73</u> 7.42	<u>7.21</u> 6.28	<u>6.84</u> 5.08	<u>6.67</u> 3.51	<u>32,23</u> 0,79
3-я область	<u>3.82</u> 3.82	<u>3.67</u> 3.66	<u>3.38</u> 3.36	<u>3.07</u> 2.94	<u>2.85</u> 2.44	<u>2.83</u> 1.68	= 0,24



Продолжение таблицы 3  
Continuation of the table 3

$h/R = 1/40; p_0 = 3.0 \text{ МПа}; L/R = 1/10; k = 1 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3, H = 2 \text{ м}$							
$P = F/F_3$	0.342	0.365	0.380	0.391	0.410	0.425	0,44
1-я область	<u>34.86</u> 34.86	<u>32.79</u> 30.92	<u>30.44</u> 27.38	<u>30.33</u> 24.35	<u>47.72</u> 13.79	= 8,71	= 2,58
2-я область	<u>8.71</u> 8.71	<u>7.87</u> 7.66	<u>7.33</u> 6.62	<u>7.01</u> 5.71	<u>11.58</u> 2.65	<u>18,21</u> 1,59	- 0,41
3-я область	<u>3.87</u> 3.87	<u>3.46</u> 3.44	<u>3.15</u> 3.06	<u>2.95</u> 2.71	<u>5.00</u> 1.91	= 0,63	= 0,09
$h/R = 1/40; p_0 = 3.0 \text{ МПа}; L/R = 1/10; k = 3 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3, H = 2 \text{ м}$							
$P = F/F_3$	0.675	0.690	0.710	0.720	0.740	0.750	0,77
1-я область	<u>35.25</u> 35.25	<u>33.14</u> 32.93	<u>30.85</u> 28.85	<u>30.27</u> 26.16	<u>33.86</u> 18.83	<u>50.14</u> 14.16	= 4,56
2-я область	<u>8.81</u> 8.81	<u>8.26</u> 8.21	<u>7.53</u> 7.06	<u>7.19</u> 6.25	<u>6.68</u> 4.10	<u>6.77</u> 2.84	<u>40,37</u> 0,76
3-я область	<u>3.91</u> 3.91	<u>3.66</u> 3.66	<u>3.27</u> 3.22	<u>3.06</u> 2.92	<u>2.77</u> 1.98	<u>3.12</u> 1.32	= 0,23

Таблица 4  
Table 4

Наземный нефтепровод.

Значение частоты возмущения  $\omega_0$ , Гц, для верхней и нижней границы областей неустойчивости в зависимости от параметра продольной силы

Elevated oil pipeline. The value of the perturbation frequency  $\omega_0$ , Hz, for the upper and lower boundary of the instability areas depending on the longitudinal force parameter

$h/R = 1/40; p_0 = 3.0 \text{ МПа}; L/R = 1/10; k = 0.5 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3$							
$P = F/F_3$	0.205	0.215	0.23	0.25	0.28	0.305	0.32
1-я область	<u>34.27</u> 34.27	<u>32.89</u> 32.61	<u>31.13</u> 29.59	<u>30.40</u> 23.97	<u>243.07</u> 10.63	= 1.12	= 0.001
2-я область	<u>8.56</u> 8.56	<u>8.20</u> 8.12	<u>7.65</u> 7.28	<u>6.97</u> 5.59	<u>7.33</u> 2.01	- 0.17	32.23 0.0001
3-я область	<u>3.80</u> 3.80	<u>3.63</u> 3.62	<u>3.34</u> 3.31	<u>2.93</u> 2.66	<u>5.58</u> 0.86	= 0.02	= 0
$h/R = 1/40; p_0 = 3.0 \text{ МПа}; L/R = 1/10; k = 1 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3$							
$P = F/F_3$	0.23	0.25	0.27	0.28	0.30	0.32	0.33
1-я область	<u>34.52</u> 34.52	<u>31.86</u> 31.04	<u>30.27</u> 26.12	<u>30.72</u> 22.81	<u>50.71</u> 14.03	= 4.51	= 1.46
2-я область	<u>8.62</u> 8.62	<u>7.89</u> 7.69	<u>7.18</u> 6.24	<u>6.88</u> 5.25	<u>6.77</u> 2.82	<u>45.15</u> 0.75	- 0.23
3-я область	<u>3.83</u> 3.83	<u>3.47</u> 3.44	<u>3.06</u> 2.92	<u>2.87</u> 2.51	<u>3.13</u> 1.31	= 0.22	= 0.04
$h/R = 1/40; p_0 = 3.0 \text{ МПа}; L/R = 1/10; k = 3 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3$							
$P = F/F_3$	0.335	0.365	0.380	0.391	0.410	0.425	0.44
1-я область	<u>34.79</u> 34.79	<u>31.01</u> 29.28	<u>30.26</u> 25.18	<u>31.51</u> 21.25	<u>71.63</u> 12.48	= 5.27	= 0.89
2-я область	<u>8.70</u> 8.70	<u>7.61</u> 7.18	<u>7.08</u> 5.96	<u>6.78</u> 4.79	<u>6.94</u> 2.44	<u>18.18</u> 0.91	- 0.13
3-я область	<u>3.86</u> 3.86	<u>3.31</u> 3.27	<u>3.01</u> 2.81	<u>2.81</u> 2.31	<u>3.63</u> 1.11	= 0.28	= 0.02

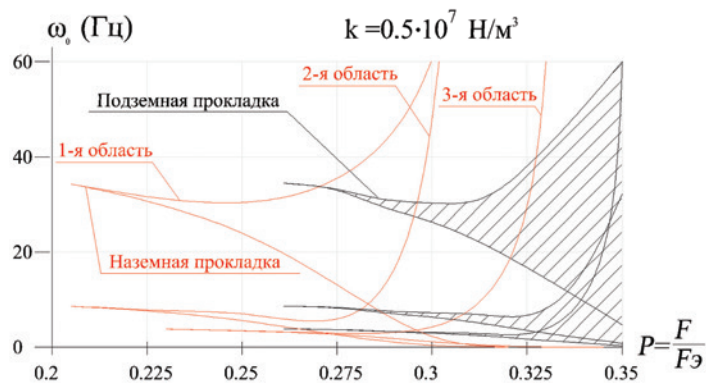


Рис. 2. Области динамической неустойчивости для подземного и наземного нефтепровода в зависимости от изменения величины параметра продольной силы при коэффициенте отпора грунта  $k = 0.5 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3$   
 Fig. 2. Dynamic instability areas for underground and elevated oil pipeline depending on the change of the longitudinal force parameter value at the soil resistant coefficient  $k = 0.5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^3$

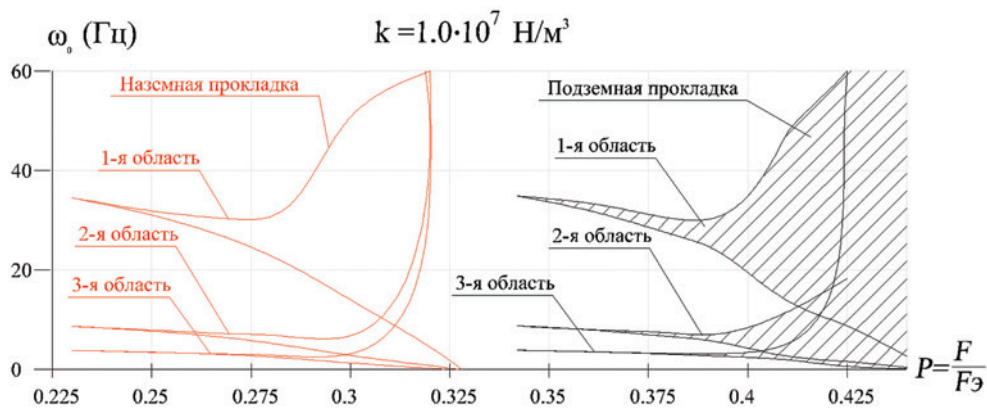


Рис. 3. Области динамической неустойчивости для подземного и наземного нефтепровода в зависимости от изменения величины параметра продольной силы при коэффициенте отпора грунта  $k = 1.0 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3$   
 Fig. 3. Dynamic instability areas for underground and elevated oil pipeline depending on the change of the longitudinal force parameter value at the soil resistant coefficient  $k = 1.0 \cdot 10^7 \text{ N/m}^3$

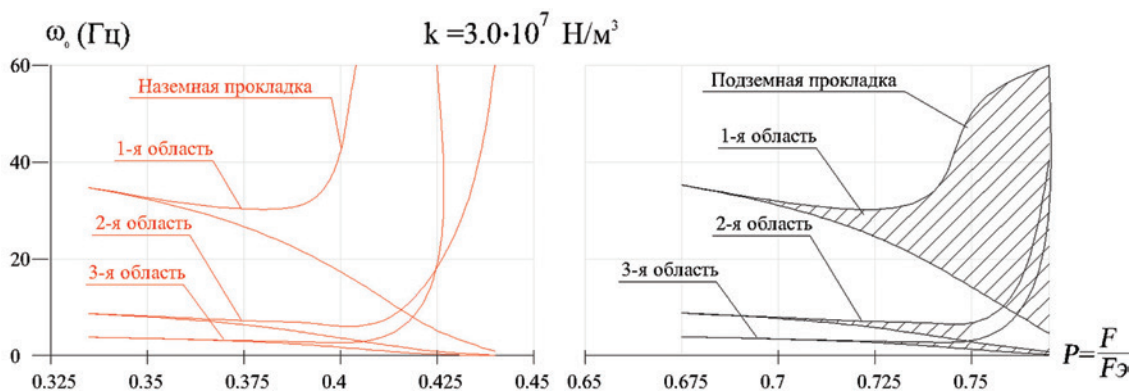


Рис. 4. Области динамической неустойчивости для подземного и наземного нефтепровода в зависимости от изменения величины параметра продольной силы при коэффициенте отпора грунта  $k = 3.0 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3$   
 Fig. 4. Dynamic instability areas for underground and elevated oil pipeline depending on the change of the longitudinal force parameter value at the soil resistant coefficient  $k = 3.0 \cdot 10^7 \text{ N/m}^3$

Анализ значений таблиц 3 и 4, а также графиков на рис. 2–4 показывает, что увеличение параметра  $P$  ведет к расширению областей для всех параметров тонкостенности, то есть вероятность возникновения параметрического резонанса резко возрастает. Представленные значения и графики позволяют сделать следующие выводы:

- с увеличением коэффициента  $k$  области динамической неустойчивости смещаются в сторону увеличения значения параметра  $P$ ;
- при сравнении наземной и подземной прокладки области имеют различные местоположения. Области для подземного трубопровода смещены вправо, в сторону увеличения параметра  $P$ . Чем больше коэффициент упругого отпора грунта, тем дальше это смещение;
- при относительно небольших значениях  $k$  от  $0.1 \cdot 10^7$  до  $0.5 \cdot 10^7$  Н/м<sup>3</sup> области располагаются близко друг к другу, а при значениях больше единицы достаточно далеко друг от друга, что повышает динамическую устойчивость;

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-2681.2022.4 «Аналитические методы определения динамических характеристик тонкостенных трубопроводов большого диаметра в среде "труба – грунт" при стационарных и нестационарных воздействиях».

- влияние упругого отпора грунта на подземный трубопровод более выражено, чем при наземной прокладке ввиду большего взаимодействия периметра трубы с грунтом.

### **Выводы**

При рассмотрении подземного участка трубопровода была решена задача о параметрическом резонансе для подземных тонкостенных труб (цилиндрических оболочек) при нестационарном давлении с учетом сил сопротивления среды. Решение сведено к системе дифференциальных уравнений Матье. При построении областей неустойчивости в случае подземной прокладки используются неравенства, учитывающие демпфирующие действия грунтовой среды, а для наземного способа прокладки границы определяются с помощью аналитических выражений, которые были предложены ранее. Анализ полученных данных показал, что для подземных трубопроводов, по сравнению с наземной прокладкой, появление параметрического резонанса менее вероятно.

**Acknowledgements.** The research was financially supported by the grant of the President of the Russian Federation for the state support of young Russian scientists – candidates of sciences МК-2681.2022.4 "Analytical methods of determining the dynamic characteristics of thin-walled pipelines of large diameter in the medium "pipe – soil" under stationary and non-stationary impacts".

### **Библиографический список**

1. Barros, R. C. A parametric study on the comprehensive analysis of pipelines under generalized actions / R. C. Barros, M. Pereira. – Текст : электронный // 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B. C., Canada, August 1-6, 2004. – No. 2311. – URL: [https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13\\_2311.pdf](https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_2311.pdf) (дата обращения: 11.08.2023).
2. Jin, J. D. Parametric resonances of supported pipes conveying pulsating fluid / J. D. Jin, Z. Y. Song. – DOI 10.1016/j.jfluidstructs.2005.04.007. – Текст : непосредственный // Journal of Fluids and Structures, 2005. – № 20 (6). – P. 763–783.
3. Formulation for dynamic instability of fluid-conveying pipe on nonuniform elastic foundation / A. Marzani, M. Mazzotti, E. Viola [et al.]. – DOI 10.1080/15397734.2011.618443. – Текст : непосредственный // Mech based des struct mech. – 2012. – No 40. – P. 83–95.

4. McDonald, R. Pipes conveying pulsating fluid near a 0:1 resonance: Global bifurcations / R. McDonald, N. Namachchivaya. – DOI 10.1016/j.jfluidstructs.2005.07.015. – Текст : непосредственный // Journal of Fluids and Structures. – 2005. – No 21. – P. 665–687.
5. Stability analysis of composite thin-walled pipes conveying fluid / R. Bahaadini, M. R. Dashtbayazi, M. Hosseini, Z. Khalili-Parizi. – DOI 10.1016/j.oceaneng.2018.04.061. – Текст : непосредственный // Ocean Engineering. – 2018. – No 160. – P. 311–323.
6. Васина, В. Н. Параметрические колебания участка трубопровода с протекающей жидкостью / В. Н. Васина. – Текст : непосредственный // Вестник МЭИ. – 2007. – № 1. – С. 1–11.
7. Yang, H.-Zh. Parametric resonance of submerged floating pipelines with bi-frequency parametric and vortex-induced oscillations excitations / H.-Zh. Yang, Zh. Wang, F. Xiao. – DOI 10.1080/17445302.2016.1171590. – Текст : непосредственный // Ships and Offshore Structures, 2016. – No 12. – С. 1–9.
8. Zhou, L. Stability and bifurcation analysis of a pipe conveying pulsating fluid with combination parametric and internal resonances / L. Zhou, F. Chen, Y. Chen. – DOI 10.19029/mca-2015-017. – Текст : непосредственный // Mathematical and Computational Applications, 2015. – No 20. – 200–216.
9. Panda, L. Nonlinear dynamics of a pipe conveying pulsating fluid with parametric and internal resonances / L. Panda, R. Kar. – DOI 10.1007/s11071-006-9100-6. – Текст : непосредственный // Nonlinear Dynamics, 2007. – No 49. – 9–30.
10. Sokolov, V. Effect of internal pressure on parametric vibrations and dynamic stability of thin-walled ground pipeline larger diameter connect with elastic foundation / V. Sokolov, I. Razov, Y. Ogorodnova. – DOI 10.1051/mateconf/20167304002. – Текст : электронный // MATEC Web of Conferences, 2016. – 73(3):04002. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/306076693> (дата обращения: 07.08.2023).
11. Ильгамов, М. А. Вынужденные и параметрические колебания трубопровода / М. А. Ильгамов, М. М. Шакирьянов. – DOI 10.31040/2222-8349-2020-0-3-5-11. – Текст : непосредственный // Известия Уфимского научного центра РАН. – 2020. – № 3. – С. 5–11.
12. Валиев, М. И. Собственные и параметрические колебания криволинейных участков трубопровода при пульсирующем движении слабосжимаемой жидкости / М. И. Валиев, В. В. Жолобов, Е. И. Тарновский. – Текст : непосредственный // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2013. – № 2 (10). – С. 48–54.
13. Dmitriev, A. Influence of longitudinal force and internal pressure on the frequency of free vibrations of an underground oil pipeline / A. Dmitriev, V. Sokolov, A. Bereznyov. – DOI 10.1051/e3sconf/202021701010. – Текст : непосредственный // E3S Web of Conferences, 2020. – 217:01010. – URL: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/77/e3sconf\\_ersme2020\\_01010.pdf](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/77/e3sconf_ersme2020_01010.pdf) (дата обращения: 07.08.2023).
14. Дмитриев, А. В. Частотные характеристики трубопровода большого диаметра с потоком жидкости в упругой грунтовой среде с учетом внутреннего давления / А. В. Дмитриев, В. Г. Соколов, А. В. Березнев. – Текст : электронный // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12, № 6. – С. 5. – URL: <https://esj.today/PDF/05SAVN620.pdf> (дата обращения: 07.07.2023).
15. Боголюбов, Н. Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский. – Москва : Наука, 1974. – 503 с. – Текст : непосредственный.
16. Соколов, В. Г. Свободные колебания тонкостенных газопроводов большого диаметра при полуподземной прокладке / В. Г. Соколов, И. О. Разов. – Текст : непосредственный // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 6 (59). – С. 114–120.
17. Разов, И. О. Напряжения и перемещения на контактной поверхности наземного трубопровода большого диаметра / И. О. Разов. – Текст : непосредственный // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 3 (50). – С. 105–108.

## References

1. Barros, R. C., & Pereira, M. (2004). A parametric study on the comprehensive analysis of pipelines under generalized actions. 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B. C., Canada, August 1-6, Paper No 2311. (In English). Available at: [https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13\\_2311.pdf](https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_2311.pdf) (accessed 11.08.2023).
2. Jin, J. D., & Song, Z. Y. (2005). Parametric resonances of supported pipes conveying pulsating fluid. *Journal of Fluids and Structures*, (20(6)), pp. 763-783. (In English). DOI 10.1016/j.jfluidstructs.2005.04.007.
3. Marzani, A., Mazzotti, M., Viola, E., Vittori, P., & Elishakoff, I. (2012). Formulation for dynamic instability of fluid-conveying pipe on nonuniform elastic foundation. *Mech based des struct mech*, (40), pp. 83-95. (In English). DOI 10.1080/15397734.2011.618443.
4. McDonald, R., & Namachchivaya, N. (2005). Pipes conveying pulsating fluid near a 0:1 resonance: Global bifurcations. *Journal of Fluids and Structures*, (21), pp. 665-687. (In English). DOI 10.1016/j.jfluidstructs.2005.07.015.
5. Bahaadini, R., Dashtbayazi, M. R., Hosseini, M., & Khalili-Parizi, Z. (2018). Stability analysis of composite thin-walled pipes conveying fluid. *Ocean Engineering*, (160), pp. 311-323. (In English). DOI 10.1016/j.oceaneng.2018.04.061.
6. Vasina, V. N. (2007). Parametric oscillations of a pipeline section with a flowing liquid. *Bulletin of the MEI*, (1), pp. 1-11. (In Russian).
7. Yang, H.-Zh., Wang, Zh., & Xiao, F. (2016). Parametric resonance of submerged floating pipelines with bi-frequency parametric and vortex-induced oscillations excitations. *Ships and Offshore Structures*, (12), pp. 1-9. (In English). DOI 10.1080/17445302.2016.1171590.
8. Zhou, L., Chen, F., & Chen, Y. (2015). Stability and bifurcation analysis of a pipe conveying pulsating fluid with combination parametric and internal resonances. *Mathematical and Computational Applications*, (20), pp. 200-216. (In English). DOI 10.19029/mca-2015-017.
9. Panda, L., & Kar, R. (2007). Nonlinear dynamics of a pipe conveying pulsating fluid with parametric and internal resonances. *Nonlinear Dynamics*, (49), pp. 9-30. (In English). DOI 10.1007/s11071-006-9100-6.
10. Sokolov, V., Razov, I., & Ogorodnova, Y. (2016). Effect of internal pressure on parametric vibrations and dynamic stability of thin-walled ground pipeline larger diameter connect with elastic foundation. *MATEC Web of Conferences*, 73:04002. (In English). Available at: <https://www.researchgate.net/publication/306076693> (accessed 07.08.2023). DOI 10.1051/mateconf/20167304002.
11. Ilgamov, M. A., & Shakiryaynov, M. M. (2020). Forced and parametric vibrations of a pipe. *Proceedings of the RAS Ufa scientific centre*, (3), pp. 5-11. (In Russian). DOI 10.31040/2222-8349-2020-0-3-5-11.
12. Valiev, M. I., Zholobov, V. V., & Tarnovsky, E. I. (2013). Self-induced and parametric vibrations of pipeline curvilinear areas in pulsative motion of low viscous liquid. *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, (2(10)), pp. 48-54. (In Russian).
13. Dmitriev, A., Sokolov, V., & Bereznyov, A. (2020). Influence of longitudinal force and internal pressure on the frequency of free vibrations of an underground oil pipeline. *E3S Web of Conferences*, (217), 01010. (In English). Available at: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/77/e3sconf\\_ersme2020\\_01010.pdf](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/77/e3sconf_ersme2020_01010.pdf) (accessed 07.08.2023). DOI 10.1051/e3sconf/202021701010.
14. Dmitriev, A. V., Sokolov, V. G., & Bereznev, A. V. (2020). Frequency characteristics of a large-diameter pipeline with a fluid flow in an elastic ground environment, taking into account internal pressure. *The Eurasian Scientific Journal*, 12(6). Available at: <https://esj.today/PDF/05SAVN620.pdf> (accessed 07.07.2023). (In Russian).
15. Bogolyubov, N. N., & Mitropol'skiy, Yu. A. (1974). *Asimptoticheskie metody v teorii nelineynykh kolebaniy*. Moscow, Nauka Publ., 503 p. (In Russian).

16. Sokolov, V. G., & Razov, I. O. (2016). Free vibrations of thin-walled large-diameter gas pipelines at semi-underground laying. *Bulletin of Civil Engineers*, (6(59)), pp. 114-120. (In Russian).
17. Razov, I. O. (2015). Ensiions and displacements on the contact surface of the large diameter ground-surface pipeline. *Bulletin of Civil Engineers*, (3(50)), pp. 105-108. (In Russian).

#### **Сведения об авторах**

Разов Игорь Олегович, канд. техн. наук, доцент, доцент базовой кафедры АО «Мостострой-11», Тюменский индустриальный университет, e-mail: razovio@mail.ru

Соколов Владимир Григорьевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры строительной механики, Тюменский индустриальный университет

Дмитриев Андрей Викторович, канд. техн. наук, доцент кафедры строительной механики, Тюменский индустриальный университет

Березнев Алексей Валерьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры строительной механики, Тюменский индустриальный университет

#### **Information about the authors**

Igor O. Razov, Candidate in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Base Department JSC «Mostostroy-11», Industrial University of Tyumen, e-mail: razovio@mail.ru

Vladimir G. Sokolov, Doctor in Engineering, Associate Professor, Professor at the Department of Structural Mechanics, Industrial University of Tyumen

Andrey V. Dmitriev, Candidate in Engineering, Associate Professor at the Department of Structural Mechanics, Industrial University of Tyumen

Alexey V. Bereznev, Candidate in Engineering, Associate Professor at the Department of Structural Mechanics, Industrial University of Tyumen

*Получена 17 августа 2023 г., одобрена 07 сентября 2023 г., принята к публикации 28 сентября 2023 г.*

*Received 17 August 2023, Approved 07 September 2023, Accepted for publication 28 September 2023*

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ТЮМЕНСКОГО РЕГИОНА

А. Г. Жулин, О. В. Сидоренко, Л. В. Белова  
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

## TECHNOLOGICAL SCHEMES FOR DEFERRIZATION OF GROUNDWATER IN THE TYUMEN REGION

Alexander G. Zhulin, Olga V. Sidorenko, Larisa V. Belova  
Industrial University of Tyumen, Russia

**Аннотация.** Подземные воды Тюменского региона начиная с конца 1970-х годов широко использовались для питьевого водоснабжения, что обусловило повсеместное строительство станций обезжелезивания. Анализ литературных источников и наблюдение за некоторыми станциями обезжелезивания региона в течение длительного времени позволили систематизировать применяемые технологии обезжелезивания в хронологическом порядке по мере их усложнения. Наибольшее распространение на начальных этапах получил метод обезжелезивания с упрощенной аэрацией, что способствовало внедрению блочно-комплектных станций обезжелезивания на объектах средней и малой производительности. В настоящее время в связи с ужесточением требований к качеству питьевой воды происходит переход от безреагентных методов к реагентным, что, соответственно, ведет к отказу от типовых технологических схем обезжелезивания и применению станций подготовки воды, собираемых из узлов стандартного оборудования.

**Abstract.** Since the late 1970s, groundwater in the Tyumen region was widely used for drinking water supply. It was the reason of the widespread construction of deferrization stations. Analysis of literature and monitoring of some deferrization stations in the region for a long time allowed us to systematise the applied deferrization technologies in chronological order as they become more complex. The method of deferrization with simplified aeration was the most widespread in the initial stages. This decision facilitated the introduction of block-complete deferrization stations at medium and small capacity facilities. Nowadays, there is a transition from reagentless methods to reagent methods due to tightening of requirements to drinking water quality. This, accordingly, leads to the rejection of typical technological schemes of deferrization and the use of water treatment plants assembled from standard equipment units. The review of foreign and domestic studies showed that the existing results of their generalisation in the form of some mathematical dependencies

Обзор зарубежных и отечественных исследований обезжелезивания воды показал, что существующие результаты их обобщения в виде некоторых математических зависимостей недостаточны и требуют дальнейшего изучения и проведения дополнительных исследований. Предлагаемые усложненные технологии на современном этапе не являются оптимальными с экономической точки зрения и зачастую не являются эффективными.

**Ключевые слова:** обезжелезивание, технологическая схема, блочно-комплектная станция, примеси подземной воды, железобактерии, упрощенная аэрация, двухступенчатое фильтрование, реагенты-окислители

were insufficient and required further study and additional research. The technologies offered today are more complex but they are not economically optimal and efficient.

**Key words:** deferrization, technological scheme, block-complete station, groundwater impurities, iron bacteria, simplified aeration, two-stage filtration, oxidising reagents

**Для цитирования:** Жулин, А. Г. Технологические схемы обезжелезивания подземных вод Тюменского региона / А. Г. Жулин, О. В. Сидоренко, Л. В. Белова. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-61-71. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 3 (105). – С. 61–71.

**For citation:** Zhulin, A. G., Sidorenko, O. V., & Belova, L. V. (2023). Technological schemes for deferrization of groundwater in the Tyumen region. *Architecture, Construction, Transport*, (3(105)), pp. 61-71. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-61-71.

## Введение

Обезжелезивание подземных вод в стране началось в конце 1960 – начале 1970-х годов. Связано это было с активными исследованиями АКХ г. Москвы метода упрощенной аэрации по устранению растворенного железа в воде. Простота метода и достижение удовлетворительных положительных результатов послужили поводом к его регламентации и внедрению типовой

технологической схемы<sup>1,2</sup>. В то время отклонения от типовых схем не допускались.

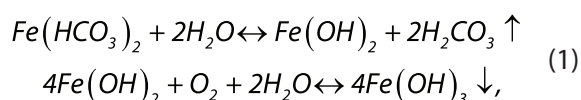
В ряде населенных пунктов, подававших подземную воду без подготовки, с целью улучшения ситуации были построены станции, работающие на основе метода упрощенной аэрации. Большая часть станций по качественным показателям исходной воды, содержанию железа и его форм соответствовали рекомендациям типовой схе-

<sup>1</sup> Указания по проектированию установок для обезжелезивания воды / Академия строительства и архитектуры СССР ; Всесоюзный научно-исследовательский институт водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрогеологии «Водгео». – 2-е издание, с изменениями и дополнениями. – Москва : [б. и.]. – 1959. – 35 с. – Текст : непосредственный.

<sup>2</sup> Технические указания на проектирование и эксплуатацию станций обезжелезивания воды фильтрованием с упрощенной системой аэрации : утверждены 10.06.1965 / Министерство коммунального хозяйства РСФСР ; Академия коммунального хозяйства им. К. Д. Памфилова. – Москва ; Ленинград : Отдел научно-технической информации. – 1966. – 10 с. – Текст : непосредственный.



мы обработки. Она включала скорый фильтр, в котором насыщение воды кислородом для окисления железа осуществлялось путем разлива-падения воды с высоты 0.5–0.6 м. Это обеспечивало растворение кислорода в количестве не менее 5 мг/дм<sup>3</sup> (как правило, этот показатель был выше и нередко доходил до 10 мг/дм<sup>3</sup>). Так как, согласно уравнению:



для окисления 1 мг железа требуется 0.143 мг кислорода, считается, что растворившегося кислорода достаточно для окисления 10 мг/дм<sup>3</sup> железа с учетом расходования на окисление других химических соединений природной воды.

Необходимость скорого обеспечения водой разрабатываемого нефтегазового комплекса Тюменского региона обусловила внедрение на объектах блочно-комплектных установок двойного назначения *вода – тепло* [1, 2], которые работали на подземной воде. Технологическая схема включала обезжелезивание с последующим умягчением.

В связи с однотипностью установок и неучетом разнообразия качественного состава природной воды потребители в некоторых случаях получали воду с неудовлетворительными показателями.

#### **Объект и методы исследования**

Объектом исследования являются станции обезжелезивания Тюменского региона и публикации отечественных и зарубежных ученых, касающиеся технологии обезжелезивания.

Применены методы теоретического исследования, такие как анализ, синтез и обобщение. Об-

зор по изменению технологии обезжелезивания подземной воды в Тюменском регионе выполнен на основе первоисточников зарубежной, отечественной периодической и книжной литературы.

#### **Результаты и обсуждение**

Неудовлетворительные результаты работы станций обезжелезивания региона объяснялись неэффективностью процессов дегазации-аэрации (снижения содержания углекислоты), но, ввиду недостаточно жестких требований к станциям, работающим на подземных водах, нарушение ГОСТа<sup>3</sup> не отмечалось.

Ввиду повсеместного избыточного содержания углекислого газа в подземной воде региона требовалось снижение его концентрации до равновесных значений, обеспечивающих повышение величины рН с целью уменьшения коррозионных свойств и обеспечения условий по удалению растворенных примесей [3, 4]. Особую трудность в этом отношении представляют мягкие воды Севера, в которых углекислотное равновесие нестабильно [5]. Эксплуатация станций обезжелезивания в первоначальном варианте показала, что схема упрощенной аэрации не является универсальной, не учитывает отдельные характеристики воды, в частности, показатель наличия углекислоты как регулятора рН, который ранее не регламентировался ГОСТом. Влияние углекислоты не учитывалось, в то время как ее содержание составляло 40–180 мг/дм<sup>3</sup>, и для улучшения процесса обезжелезивания в дальнейшем появилась необходимость использования активных аэрационных методов дегазации-аэрации.

Удовлетворительные количественные показатели железа и снижение содержания CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> после обработки воды на градирне в г. Сургуте послужили поводом для возможного

<sup>3</sup> ГОСТ 2874-82. Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством = Drinking water. Hygienic requirements and quality control : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Комитета стандартов от 18.10.82 № 3989 / разработан и внесен Министерством здравоохранения СССР ; разработчики К. И. Акулов, В. Т. Мазаев, А. А. Королев, Т. Г. Шлепнина. – Москва : ИПК Издательство стандартов. – 1982. – 10 с. – Текст : непосредственный.

использования градирен в более широком масштабе. Были предложены технические решения блочного варианта, но данные сооружения отличались громоздкостью (градирня устраивалась над контактным резервуаром и имела большую высоту), а опыт эксплуатации самих градирен (с естественной аэрацией в г. Салехарде, вентиляторной в г. Сургуте) показал необходимость частой прочистки насадки. Такой вариант получил негативную оценку производителей, поэтому для удаления значительных количеств  $\text{CO}_2$  стали приниматься барботажные или другие установки. В ряде случаев в напорном варианте была принята увеличенная подача воздуха в больших по сравнению с рекомендуемым значением 2 л на 1 г Fe, что дало положительные результаты.

Активное внедрение СанПиН<sup>4</sup> в 1990-е годы, нормативная часть которого увеличилась, а требования к качеству ужесточились, привело к тому, что практически все станции, работающие на подземной воде, не соответствовали нормам по тому или иному показателю. Это потребовало принятия нового решения по оборудованию. В настоящее время большинство станций средней и малой производительности выполнены в блочно-модульном исполнении, как правило, они отличаются объемами зданий в зависимости от принимаемого оборудования заводского исполнения.

Недостатком СанПиН является неучет природного процесса формирования реальных качественных показателей подземной воды, количественных значений влияния примесей на здоровье человека, что приводит к возможным осложнениям технологических схем, бесполезным с точки зрения строительства и эксплуатации.

То, что нормируемые показатели СанПиН необъективны, хорошо видно при сравнении с нормативными требованиями других стран –

разница в 5–10 раз (согласно ВОЗ, допустимые пределы по содержанию железа 0.3–1.0, марганца 0.1–0.5, аммонийных соединений до 10 мг/дм<sup>3</sup> и т. д.). Примером нереальности выполнения рекомендаций СанПиН служит показатель содержания кремниевых соединений в условиях Севера Тюменского региона и, главное, неучет происхождения таковых. Местные санитарно-эпидемиологические органы стали требовать выполнения нормативного значения, которое предусматривало искусственное происхождение кремния, а не естественное. В последней редакции СанПиН показатель пришлось привести в соответствие с реальностью, требования по количественному содержанию кремниевых соединений были снижены.

Ряд химических элементов природного происхождения в реально имеющихся концентрациях не представляют угрозы для здоровья человека и могут нормироваться только по влиянию на органолептические свойства воды.

В современных условиях в результате усложнения технологии очистки применение блочных установок прекращено. Необоснованное усложнение технологических схем с применением дорогостоящего оборудования заводского изготовления приводит к значительному удорожанию станций.

Многообразие методов обезжелезивания связано с физико-химическими свойствами природной воды, целевым назначением подготовки, необходимостью минимизации строительных затрат и оптимизации эксплуатационных качественных показателей. В нашем случае данный метод рассматривается с позиции улучшения качества питьевой воды в условиях региона.

Методы обезжелезивания в зависимости от частоты использования в той или иной мере подвергались исследованиям, но ввиду большого

---

<sup>4</sup> Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества : (СанПиН 2.1.4.559-96) : утверждены и введены в действие постановлением Госкомсанэпиднадзора России от 24 октября 1996 г. № 26 : введены впервые. – Москва : Госкомсанэпиднадзор России. – 1996. – 111 с. – Текст : непосредственный.

числа влияющих факторов в основном приводятся результаты практической направленности отдельных объектов.

Достаточно полно в научной литературе изучено химическое окисление железа по многоступенчатой схеме с представлением расчетных коэффициентов диссоциации и значений окислительно-восстановительного потенциала системы  $Eh$  [5–9]. Однако в реальных условиях процесс обезжелезивания не протекает в чистом виде (без влияния бактерий и наличия примесей), поэтому применение в практических целях данных научных результатов минимально. На рис. 1 приведен перечень технологических схем, которые были приняты в условиях региона.

В странах бывшего СЭВ (СССР, ГДР, Польша, Чехословакия) методу упрощенной аэрации был посвящен значительный объем исследований, конечной целью которых была разработка расчетных параметров для проектирования сооружений [10].

Участие железобактерий в процессе снижения содержания железа обозначил Н. Kittner [10]. Однозначного объяснения хода совместного протекания процессов окисления железа исследователи не нашли, но отмечена роль осадка на загрузке фильтра как адсорбента кислорода, который участвует в окислении вновь поступающего двухвалентного железа, с образованием и непрерывным обновлением каталитической ад-

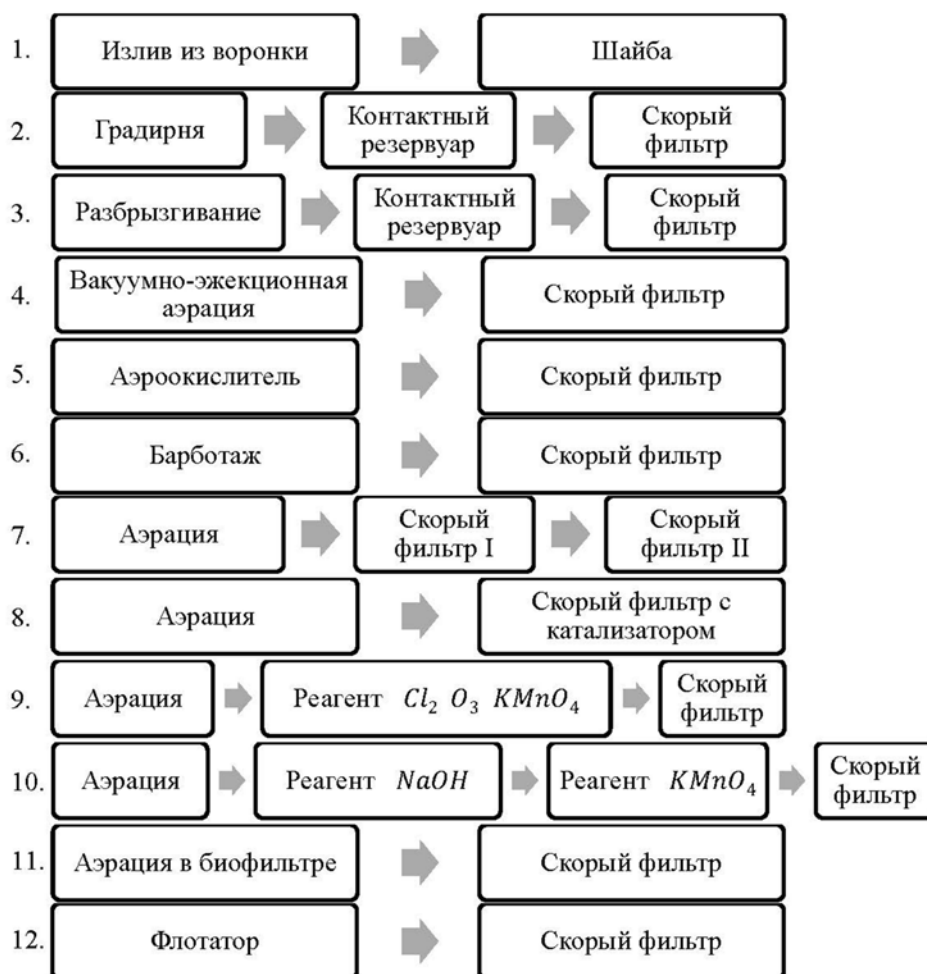


Рис. 1. Технологические схемы обезжелезивания  
Fig. 1. Technological schemes of deferrization

сорбционной пленки при наличии кислорода в воде. В дальнейшем было выявлено, что железистые отложения на загрузке являются двойным интенсификатором перехода двухвалентного железа в осадочную форму – химического и биологического процесса. Упрощенное химическое окисление под влиянием каталитического слоя описывает уравнение (1), в биологическом процессе отложения оксида железа являются питательной средой для развития бактерий [5].

Недостатком некоторых исследований можно считать проведение экспериментов с имитатами (модельными растворами), что не может служить надежным условием получения идентичных результатов, так как окисление железа в природной воде зависит от большого числа показателей (рН, окисляемости, наличия органики,  $H_2SiO_3$ ,  $H_2S$ ,  $CO_2$  температуры воды и др.). Относительно широко исследовано влияние температуры и органики на ход биологического окисления железа, что объясняется многообразием видов железобактерий, развивающихся при различной температуре воды (интервал значений составляет 0.5–10 °С) [11].

Расчетные выражения сложно назвать достоверными, так как процесс обезжелезивания связан не только с химическими (с большим количеством примесей), но и биологическими процессами [10, 11]. Различия в степенных значениях, необходимость определения некоторых параметров (постоянных), различные компоненты в формулах, полученных методами планирования эксперимента, свидетельствуют об отсутствии их универсальности. Как правило, они применимы для конкретных источников.

Halle K. [9] по результатам исследований предложил расчетный вид уравнения для назначения высоты слоя загрузки  $L$ , м:

$$L = a \cdot d_m \cdot V^{0.6} \cdot Fe_0^p \cdot T^{-0.4}, \quad (2)$$

где  $a$ ,  $p$  – постоянные, зависящие от отношения  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$  (приведены в [12]),

$d_m$  – средний диаметр загрузки фильтра, мм,  
 $V$  – скорость фильтрования, м/ч,

$T$  – температура исходной воды, °С,

$Fe_0$  – содержание железа в исходной воде, мг/дм<sup>3</sup>.

Ожидаемая продолжительность фильтроцикла для безнапорных фильтров при содержании железа 3–10 мг/дм<sup>3</sup> и скорости фильтрования 3–10 м/ч составила:

$$T = 1\,040 \cdot d_m \cdot V^{(-0.7)} \cdot Fe^{-1.2}. \quad (3)$$

По В. А. Клячко и И. Э. Апельцину [12], для температуры подземной воды 5–7 °С с окислением  $Fe^{2+}$  до 60–70 % при упрощенной аэрации высоту слоя загрузки можно определять по упрощенной формуле:

$$L = 20 \cdot d_m \sqrt{V \cdot [Fe]}. \quad (4)$$

Kittner H. [10] приводит формулу Veltena S. для допустимой скорости фильтрования в скором фильтре, м/ч:

$$V = \left[ (3.0 \cdot pH - 18.6) \cdot \frac{1}{d_w} \cdot \frac{1}{C_{Fe_0}^{0.1}} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{C_{Fe_0}}{C_{Fe_k}}\right)} \cdot T^{0.8L} \right]^{1.28}, \quad (5)$$

где  $d_w = (d_{10} + d_{90}) / 2$  – действующий диаметр зерен, мм,

$Fe_k$  – содержание железа после фильтра, мг/дм<sup>3</sup>,

$pH$  – значение водородного показателя.

В. В. Дзюбо [13] на основании экспериментальных исследований для высоты слоя альбитофира  $H_3$ , м, предложил учитывать также структуру зерен, скорость фильтрования, рН, температуру и исходное содержание железа:

$$H_3 = \left( \frac{C_0}{C_{\text{вых}}} \right)^{0.58} \cdot \left( \frac{V^{1.12}}{a^{0.11} \cdot pH^{0.92} \cdot T^{1.02}} \right), \quad (6)$$

где  $C_0$  и  $C_{\text{вых}}$  – содержание железа  $Fe_{\text{общ}}$  в исходной воде и в фильтрате, мг/дм<sup>3</sup>,

$a = a \cdot (1 - n_0) / d_3$  – параметр, учитывающий granulometric characteristics фильтрующего материала,

$a$  – коэффициент формы зерен материала,

$d_3$  – эквивалентный диаметр зерна материала, мм,

$n_0$  – пористость загрузки,

$T$  – температура воды, °C.

Авторами предложено уравнение для расчета продолжительности фильтроцикла  $t_\phi$ , сут. (защитного действия загрузки):

$$t_\phi = \left( \frac{C_0}{C_{\text{вых}}} \right)^{-1.36} \cdot \left( \frac{1.12 \cdot 10^3 \cdot H_3^{1.86}}{a^{0.12} \cdot V^{1.24}} \cdot pH^{0.12} \cdot T^{0.11} \right). \quad (7)$$

Попытки обобщения данных исследований и опыта эксплуатации станций обезжелезивания, работающих по методу упрощенной аэрации, не дали однозначного решения – слишком велико многообразие физико-химического состава подземной воды. В предлагаемых формулах общая тенденция – наличие диаметра фракций загрузки (с довольно разнообразными значениями: средний, действующий, эквивалентный), остальные компоненты – разные, как правило, максимально влияющие на окисление железа в процессе исследований. Формулы в расчетах станций обезжелезивания не применяются и носят демонстрационный характер, проектирование сооружений осуществляется по нормативным рекомендациям.

Надежность эксплуатации станции обезжелезивания зависит от подготовки персонала и его навыков реагирования на изменение качественных показателей исходной воды в течение года. Характерным признаком некачественной эксплуатации фильтров является обволакивание зерен загрузки плотным слоем гидроксида железа с последующим изменением формы и размеров. Обычно это связано с отсутствием расходов на линии подачи промывной воды, в итоге при промывке не всегда обеспечивается необходимая интенсивность подачи, показателем таких явлений служит увеличение объема зерен загрузки и самое нежелательное – ее цементация.

Нарушения в эксплуатации фильтров ведут к сокращению фильтроцикла и повышенному содержанию примесей на выходе. Чтобы предотвратить подачу воды, не удовлетворяющей нормативным требованиям, станции обезжелезивания стали переходить на двухступенчатое фильтрование. Возможность такого перехода связана со снижением нормы водопотребления (СНиП – 250–300, СП – 180 л/сут. при фактическом расходе воды в селитебной зоне не более 110 л/сут.) [14] и некоторым уменьшением числа жителей в Среднем Приобье и на Севере.

Компания «Дегремон» [15] двухступенчатое фильтрование с аэрацией рекомендует при содержании железа свыше 5 мг/дм<sup>3</sup> и периодическом присутствии незначительного количества комплексных форм. Фильтр I ступени выступает в качестве окислителя примесей без удержания продуктов окисления (его называют контактным, окислительным или префильтром). Считается, что хлопья гидроксида не задерживаются здесь ввиду высоких скоростей, которые в полтора-два раза выше, чем на фильтрах II ступени, и фракций загрузки больших диаметров, чем в механических фильтрах II ступени.

Диаметр фильтра I ступени должен приниматься меньше, но, так как рекомендации не выдерживались и фильтры принимались одного размера, скорости фильтрования были одинаковыми. Фильтры I ступени задерживали часть окисленных примесей, в связи с этим требовалась их постоянная промывка, в то время как по технологии фильтр I ступени должен промываться один-два раза в месяц.

На основе двухступенчатой схемы предлагалась технология с катализатором – пиролюзитом или «почерненной» загрузкой, обработанной раствором перманганата калия.

Одноступенчатое фильтрование применяется при «сухой» фильтрации (пгт Пойковский), аэроокислении, вакуумно-эжекционном способе (пос. Боровский), с каталитической загрузкой и др. От «сухой» фильтрации в отечественной практике отказались, так как данный способ не дал ожидаемых результатов, таких как увеличение продолжительности фильтроцикла (работа

проходила в обычном 3-5-суточном режиме) и снижение расхода воды на промывку (по зарубежному опыту промывка предусматривалась не менее чем через полгода, но ее потребовалось проводить в соответствии с фильтроциклом). Промывка продолжалась не менее 25–35 минут с обычной интенсивностью.

В аэроокислительном способе присутствует элемент «сухой» фильтрации – окисление и удаление гидроксида осуществляется в одном сооружении устройством двухэтажной конструкции (верхний этаж – слой крупного гравия, который работает в режиме сухого фильтрования, нижний – механический фильтр).

Вакуумно-эжекционный способ сложнее в строительстве, неустойчив в эксплуатации и требует высоких затрат электроэнергии.

В 1990-е годы в большом количестве стали поступать зарубежные загрузки, обладающие каталитическими свойствами. Их единственным преимуществом была малая продолжительность зарядки загрузки в пусковой период, в процессе дальнейшей эксплуатации зерна обволакивались продуктами окисления, что приводило к отсутствию контакта окисляемых компонентов с катализатором. Высокая стоимость загрузок и необходимость проведения в некоторых случаях регенерации привели к сокращению их применения.

Реагентные методы обезжелезивания в зарубежной практике используются в большом объеме, в отдельных случаях – без достаточного обоснования и без использования аэрационных способов. В качестве реагентов применяются известь, хлор, гипохлорит натрия, двуокись хлора, перманганат калия, озон, перекись водорода и др. При обработке воды количество реагента, подаваемого на единицу удаляемого компонента, для разных объектов отличается в полтора-два раза.

В отечественной практике в 1990-е годы пропагандировалось и массово внедрялось озонирование подземной воды, но дороговизна оборудования, сложность технологической схемы и обязательное применение фильтров с активированным углем после обработки воды свело к минимуму использование метода.

Многочисленные исследования и рекомендации по окислению примесей хлорированием не нашли применения из-за необходимости использования контактного резервуара на 30-минутную продолжительность, дозирования реагента до точки перелома для окисления примесей и последующего устранения избытка хлора.

В последние годы на Севере региона внедрены сложные в эксплуатации реагентные технологии – с перманганатом калия и подщелачиванием едким натрием, в обычном варианте очищенная вода требует стабилизационной обработки [16]. Недостатком реагентных методов является необходимость в некоторых случаях осуществлять коагулирование продуктов окисления.

### **Выводы**

Проведенные теоретические исследования и анализ отечественных и зарубежных публикаций относительно опыта эксплуатации станций обезжелезивания позволил сделать ряд выводов:

1. Расчетные математические зависимости, полученные на основе экспериментальных данных различных авторов, по назначению конструктивных параметров фильтров обезжелезивания не всегда соответствуют реальным качественным показателям воды, так как некоторые исследования были проведены в лабораторных условиях и выполнены на имитатах.
2. Установлено, что при использовании безреагентных методов обезжелезивания не учитывается участие железобактерий в окислении железа.
3. Выбор схемы обезжелезивания следует осуществлять после проведения технологических натурных исследований непосредственно у источника.
4. Отмечается необоснованное снижение популярности метода обезжелезивания с упрощенной аэрацией в связи с ужесточением нормативных требований СанПиН и внедрением более дорогостоящих технологий.
5. С целью обезжелезивания стали чаще применять реагентные методы с недостаточным их обоснованием.

### Библиографический список

1. Жулин, А. Г. Выбор технологической схемы очистки подземных вод в районе Среднего Приобья / А. Г. Жулин, Б. Я. Белецкий, С. В. Максимова. – Текст : непосредственный // Нефтяная промышленность. Экспресс-информация: отечественный опыт. Серия: Нефтепромысловое дело. – 1987. – № 1. – С. 12–16.
2. Опыт эксплуатации станции обезжелезивания в комплектно-блочном исполнении / А. Г. Жулин, Б. Я. Белецкий, С. В. Максимова, Ю. В. Санников. – Текст : непосредственный // Нефтяная промышленность. Экспресс-информация: отечественный опыт. Серия: Нефтепромысловое дело. – 1987. – № 12. – С. 4–8.
3. Дзюбо, В. В. Ресурсы подземных вод Западно-Сибирского региона и их значимость для водоснабжения населения / В. В. Дзюбо, Л. И. Алферова. – Текст : непосредственный // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2013. – № 2 (62). – С. 12–20.
4. Глазков, Д. В. Очистка подземных вод нефтегазоносных районов Западной Сибири от газовых примесей : специальность 12.11.01 : автореферат диссертации кандидата технических наук / Д. В. Глазков ; Сибирский государственный университет путей сообщения. – Новосибирск, 2001. – 20 с. – Текст : непосредственный.
5. Николадзе, Г. И. Улучшение качества подземных вод / Г. И. Николадзе. – Москва : Стройиздат, 1987. – 239 с. – Текст : непосредственный.
6. Holluta, J. Enteisenungsgeschwindigkeit und Wasserstoffionenkonzentration / J. Holluta. – Текст : непосредственный // Jahrbuch "Vom Wasser". – 1952. – XIX Band. – S. 259–268.
7. Золотова, Е. Ф. Очистка воды от железа, марганца, фтора и сероводорода / Е. Ф. Золотова, Г. Ю. Асс. – Москва : Стройиздат, 1975. – 175 с. – Текст : непосредственный.
8. Stumm, W. Oxydation of Ferrous Iron / W. Stumm, G. Fred Lee. – Текст : непосредственный // Industrial and Engineering Chemistry. – 1961. – Vol. 53, No 2. – P. 143–146.
9. Halle, K. Beitrag zur Filtration eisen haltiger Grundwasser / K. Halle. – Текст : непосредственный // Wasserwirtschaft und Technik. – 1964. – No 12. – S. 361–365.
10. Kittner, H. Die Bemessung von Enteisenungsfiltern / H. Kittner. – Текст : непосредственный // Wasserwirtschaft und Technik. – 1968. – No 6. – S. 190–195.
11. Седлухо, Ю. П. Влияние аэрационно-дегазационных процессов на свойства подземных вод и технологии их биологического обезжелезивания и деманганации / Ю. П. Седлухо. – Текст : электронный // Polymer Construction : сайт. – 24 апреля 2018. – URL: <https://polymercon.com/press-centr/publications/113-vliyanie-aeracionno-degazacionnyx-processov-na-svojstva-podzemnyx-vod-i-technologii-ix/> (дата обращения: 02.08.2023).
12. Клячко, В. А. Очистка природных вод / В. А. Клячко, И. Э. Апельцин. – Москва : Стройиздат, 1971. – 579 с. – Текст : непосредственный.
13. Дзюбо, В. В. Подготовка подземных вод для питьевого водоснабжения малых населенных пунктов Западно-Сибирского региона : специальность 05.23.04 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Дзюбо Владимир Васильевич. – Санкт-Петербург, 2007. – 36 с. – Текст : непосредственный.
14. Жулин, А. Г. Определение количества расходуемой воды различными водопотребителями жилого сектора / А. Г. Жулин, А. Х. Аминова, Л. В. Белова. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2021. – № 1 (95). – С. 47–57.
15. Технические записки по проблемам воды : справочник. В 2 т. Т. 2 / К. Бараке, Ж. Бебен, Ж. Бернар [и др.] ; пер. с английского ; под редакцией Т. А. Карюхиной, И. Н. Чурбановой. – Москва : Стройиздат, 1983. – С. 609–1064. – Текст : непосредственный.

16. Селюков, А. В. Обезжелезивание-деманганация подземных вод водозабора «Северный» г. Ханты-Мансийска / А. В. Селюков, И. С. Байкова. – Текст : непосредственный // Водоснабжение и санитарная техника. – 2012. – № 2. – С. 15–18.

### References

1. Zhulin, A. G., Beletskiy, B. Ya., & Maksimova, S. V. (1987). Vybor tekhnologicheskoy skhemy ochistki podzemnykh vod v rayone Srednego Priob'ya. Neftyanaya promyshlennost'. Ekspress-informatsiya: otechestvennyy opyt. Seriya: Neftepromyslovoe delo, (1), pp. 12-16. (In Russian).
2. Zhulin, A. G., Beletskiy, B. Ya., Maksimova, S. V., & Sannikov, Yu. V. (1987). Opyt ekspluatatsii stantsii obezhelezivaniya v komplektno-blochnom ispolnenii. Neftyanaya promyshlennost'. Ekspress-informatsiya: otechestvennyy opyt. Seriya: Neftepromyslovoe delo, (12), pp. 4-8. (In Russian).
3. Dzyubo, V. V., & Alferova, L. I. (2013). Resursy podzemnykh vod Zapadno-Sibirskogo regiona i ikh znachimost' dlya vodosnabzheniya naseleniya. Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie, (2(62)), pp. 12-20. (In Russian).
4. Glazkov, D. V. (2001). Ochistka podzemnykh vod neftegazonosnykh rayonov Zapadnoy Sibiri ot gazovykh primesey. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk. Novosibirsk, 20 p. (In Russian).
5. Nikoladze, G. I. (1987). Uluchshenie kachestva podzemnykh vod. Moscow, Stroyizdat Publ., 239 p. (In Russian).
6. Holluta, J. (1952). Deferrisation speed and hydrogen ion concentration [Enteisungsgeschwindigkeit und Wasserstoffionenkonzentration]. Yearbook "About water" [Jahrbuch "Vom Wasser"], (XIX), pp. 259-268. (In German).
7. Zolotova, E. F. (1975). Ochistka vody ot zheleza, margantsa, ftora i serovodoroda. Moscow, Stroyizdat Publ., 175 p. (In Russian).
8. Stumm, W., & Fred Lee, G. (1961). Oxydation of ferrous iron. Industrial and Engineering Chemistry, 53(2), pp. 143-146. (In English).
9. Halle, K. (1964). Contribution to the filtration of iron-containing groundwater [Beitrag zur Filtration eisen haltiger Grundwasser]. Water management and technology [Wasserwirtschaft und Technik], (12), pp. 361-365. (In German).
10. Kittner, H. (1968). The dimensioning of deferrisation filters [Die Bemessung von Enteisungsfilttern]. Water management and technology [Wasserwirtschaft und Technik], (6), pp. 190-195. (In German).
11. Sedlukho, Yu. P. (2018). Vliyanie aeratsionno-degazatsionnykh protsessov na svoystva podzemnykh vod i tekhnologii ikh biologicheskogo obezhelezivaniya i demanganatsii. Polimer Construction. Available at: <https://polymercon.com/press-centr/publications/113-vliyanie-aeracionno-degazacionnykh-processov-na-svoystva-podzemnykh-vod-i-tekhnologii-ix/> (accessed 02.08.2023).
12. Klyachko, V. A., & Apel'tsin, I. E. (1971). Ochistka prirodnykh vod. Moscow, Stroyizdat Publ., 579 p. (In Russian).
13. Dzyubo, V. V. (2007). Podgotovka podzemnykh vod dlya pit'evogo vodosnabzheniya malyykh naselennykh punktov Zapadno-Sibirskogo regiona Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk. Saint Petersburg, 36 p. (In Russian).
14. Zhulin, A. G., Aminova, A. Kh., & Belova, L. V. (2021). Determination of the amount of water consumed by various water users of the residential sector. Architecture, Construction, Transport, (1), pp. 47-57. (In Russian).
15. Barake, K., Beben, Zh., Bernar, Zh., Berne, F., Bushar, Zh. Burginya, D., ... Tishit, A. (1983). Tekhnicheskie zapiski po problemam vody. Moscow, Stroyizdat Publ., 2, pp. 609-1064. (In Russian).



16. Selyukov, A. V., & Baikova, I. S. (2012). Deironing-demanganation of ground waters at the Severny intake facilities of Khanty-Mansiysk. *Vodosnabzhenie i sanitarnaia tekhnika*, (2), pp. 15-18. (In Russian).

#### **Сведения об авторах**

Жулин Александр Гаврилович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, e-mail: zhulinag@tyuiu.ru

Сидоренко Ольга Владимировна, канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, e-mail: sidorenkoov@tyuiu.ru

Белова Лариса Владимировна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерных систем и сооружений, заведующая кафедрой начертательной геометрии и графики, Тюменский индустриальный университет, e-mail: beloalv@tyuiu.ru

#### **Information about the authors**

Alexander G. Zhulin, Candidate in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Engineering Systems and Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: zhulinag@tyuiu.ru

Olga V. Sidorenko, Candidate in Engineering, Associate Professor, Head at the Department of Engineering Systems and Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: sidorenkoov@tyuiu.ru

Larisa V. Belova, Candidate in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Engineering Systems and Structures, Head at the Department of Descriptive Geometry and Graphics, Industrial University of Tyumen, e-mail: beloalv@tyuiu.ru

*Получена 23 августа 2023 г., одобрена 18 сентября 2023 г., принята к публикации 28 сентября 2023 г.  
Received 23 August 2023, Approved 18 September 2023, Accepted for publication 28 September 2023*

УДК 656.11

2.9.5 Эксплуатация автомобильного транспорта  
(технические науки)

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ МЕТОДОМ ОТНЕСЕННОГО ЛЕВОГО ПОВОРОТА

В. В. Морозов

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF TRAFFIC ORGANIZATION BY THE METHOD OF THE OFFSET LEFT TURN

Viacheslav V. Morozov

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Аннотация.** Объектом исследования определен процесс движения транспортных потоков в городах, а предметом – данный процесс применительно к регулируемым уличным пересечениям. Исследование направлено на повышение эффективности организации дорожного движения в части предотвращения формирования транспортных заторов на улично-дорожной сети городов. Для решения данной задачи предложено устройство отнесенного левого поворота. В ходе исследования рассмотрена улично-дорожная сеть г. Тюмени, установлены проблемные участки, где возможно осуществить устройство отнесенного левого поворота. В качестве наиболее подходящего уличного пересечения проанализировано регулируемое пересечение ул. 50 лет ВЛКСМ и ул. Геологоразведчиков. Результаты исследования показали, что применение отнесенного левого поворота позволит существенно сократить транспортные задержки и снизить риск аварийности за счет сокращения конфликтных точек. Оценка эффективности предлагаемых решений также подтвердила, что они имеют позитивный технологический, социальный, экономический и экологический эффекты.

**Abstract.** The object of the study is the process of traffic flow in cities, and the subject is this process in relation to regulated street intersections. The main goal of the study is improving the efficiency of traffic organization by preventing the formation of traffic congestion on the street and road network. To achieve this, the creation of an offset left turn was proposed. During the study, the street and road network of Tyumen was considered, and areas for possible construction of the offset left turn were identified. The regulated intersection of 50 Let VLKSM St. and Geologorazvedchikov St. was chosen as the most appropriate. The results of the study showed that the use of the offset left turn would significantly reduce traffic delays and accident risk by reducing conflict points. The evaluation of the effectiveness of proposed solutions also confirmed the positive technological, social, economic and environmental effects.

**Ключевые слова:** транспортные потоки, регулируемые пересечения, отнесенный левый поворот, транспортные заторы, аварийность

**Key words:** traffic flows, regulated intersections, offset left turn, traffic congestion, accident rate

**Для цитирования:** Морозов, В. В. Повышение эффективности организации дорожного движения методом отнесенного левого поворота / В. В. Морозов. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-72-80. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 3 (105). – С. 72–80.

**For citation:** Morozov, V. V. Improving the efficiency of traffic organization by the method of the offset left turn. Architecture, Construction, Transport, (3(105)), pp. 72-80. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-72-80.

## Введение

Несмотря на наблюдаемую положительную динамику снижения аварийности, в Российской Федерации остается актуальной проблема безопасности дорожного движения [1–3]. Поэтому для управления движением транспортных и пешеходных потоков применяется светофорное регулирование, направленное на разделение транспортных средств и пешеходов во времени [3, 4].

Однако наличие регулируемых пересечений на улично-дорожной сети является фактором, ограничивающим пропускную способность [3–7]. Как следствие, происходит образование транспортных заторов, что неизбежно влечет за собой увеличение потерь времени при перемещении, повышение расхода топлива, увеличение выбросов вредных веществ и рост социального дискомфорта [3–9]. В конечном итоге город становится менее привлекательным для жизни. В связи с этим предотвращение формирования транспортных заторов на улично-дорожной сети городов является нерешенной проблемой и серьезным вызовом для инженерных и научных сообществ.

## Объект и методы исследования

Объектом исследования является процесс движения транспортных потоков в городах, а предметом – данный процесс применительно к регулируемым уличным пересечениям.

Методологической базой исследования служит системный подход [3, 8, 10]. С учетом положений данного подхода исследуемый процесс

рассматривался на системном уровне. Частными инструментами системного подхода, применяемыми в исследовании, являлись системный анализ и синтез.

Исходя из специфики рассматриваемого процесса, работа проводилась на основании фундаментальных положений теорий транспортных потоков [3, 6] и планирования эксперимента [3, 8].

## Результаты

В данной работе под отнесенным левым поворотом понимается способ организации движения транспортных потоков на регулируемых пересечениях, при котором вводится дополнительная отделенная полоса движения с правой стороны проезжей части для более безопасного выполнения левоповоротного маневра. Повышение уровня безопасности достигается за счет того, что транспортные средства, которые планировали осуществить поворот налево, движутся в нужном им направлении уже по второстепенной улице в прямом направлении. При этом левый поворот по главной улице запрещается, следовательно, увеличивается и пропускная способность пересечения [11]. В настоящее время данный подход уже используется для решения проблем организации дорожного движения в ряде городов Российской Федерации (рис. 1).

Анализируя опыт применения отнесенного левого поворота, можно заметить, что данный способ организации движения транспортных потоков используется в основном на т-образных пе-

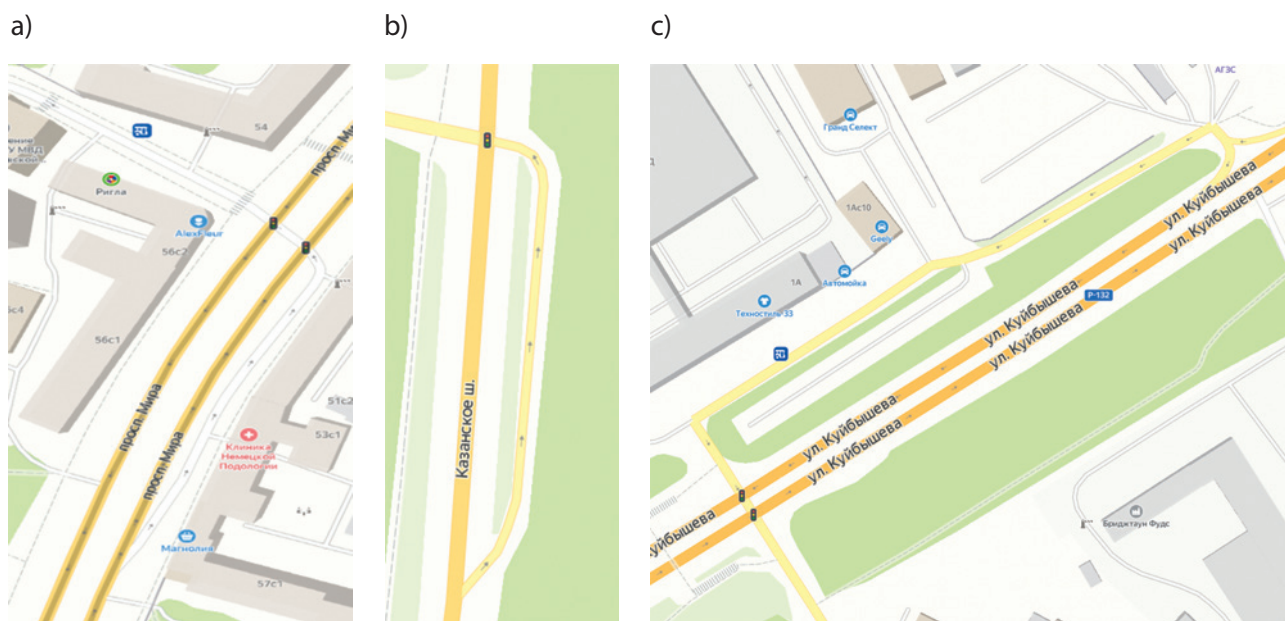


Рис. 1. Примеры отнесенных левых поворотов в городах РФ [12]: а) проспект Мира – Орлово-Давыдовский переулок, г. Москва; б) Казанское шоссе, поворот в сторону общежития НГТУ им. Р. Е. Алексева, г. Нижний Новгород; в) ул. Куйбышева – ул. Веризинская, г. Владимир

Fig. 1. Examples of the offset left turns in Russian cities [12]: а) Prospekt Mira – Orlovo-Davydovsky Lane, Moscow; б) Kazanskoe highway, turning towards the dormitory of NNSTU named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod; в) Kuibysheva St. – Verizinskaya St., Vladimir

рекрестках [11, 12]. Это обусловлено тем, что для его обустройства требуется дополнительное свободное пространство для введения отдельной полосы, которое нужно производить без грубого нарушения целостности и чрезмерного усложнения существующего уличного пересечения.

Таким образом, определение регулируемого уличного пересечения г. Тюмени, где возможно устройство отнесенного левого поворота, проводилось с учетом:

- наличия свободного пространства для размещения дополнительной полосы;
- целесообразности размещения отнесенного левого поворота.

По результатам анализа улично-дорожной сети города был сформирован перечень регулируемых пересечений, наиболее подходящих для обустройства отнесенного левого поворота (таблица 1).

Применение отнесенного левого поворота решено исследовать на регулируемом пересечении ул. 50 лет ВЛКСМ и ул. Геологоразведчиков.

Также для чистоты эксперимента были введены следующие ограничения [3]: исследование реализовывалось в условиях ясной видимости, при отсутствии осадков, наледи, на сухом дорожном покрытии.

Сбор исходных данных производился путем натурального мониторинга в утренний, дневной и вечерний часы пик в рабочие дни недели, поскольку в это время совершается большая часть всех деловых поездок, которые являются наиболее проблематичными. Для каждого обозначенного периода часа пик произведены измерения величин интенсивности движения транспортных потоков и длины транспортной очереди. Количество измерений для каждого часа пик составило 36 шт. Далее исходные данные интенсивности движения приводились к эквивалентному часовому значению с учетом коэффициентов приведения. Значения длины транспортной очереди приводились к среднему значению. Результаты сбора исходных данных представлены в таблице 2.

Таблица 1

Table 1

*Регулируемые уличные пересечения г. Тюмени  
с возможностью устройства отнесенного левого поворота  
Regulated street intersections in Tyumen with the possibility to make an offset left turn*

Наименование регулируемого пересечения	Целесообразность/нецелесообразность применения отнесенного левого поворота
ул. Алебашевская – ул. Газовиков	В случае устройства дополнительной полосы для отнесенного левого поворота транспортный поток будет выполнять перестроение через действующую полосу для движения маршрутных транспортных средств, что может оказать негативное влияние на транспорт общего пользования
ул. Дружбы – ул. Ветеранов труда	Устройство дополнительной полосы будет осуществляться в непосредственной близости от автобусной остановки, что может помешать выезду маршрутных транспортных средств и осложнить работу транспорта общего пользования. Обустройство дополнительной полосы повлечет за собой перекрытие одного из заездов на прилегающую территорию. Строительство дополнительной полосы будет происходить на территории, которая, скорее всего, находится в частной собственности, что потребует длительных и дорогостоящих процедур по выкупу необходимых земель
ул. 50 лет ВЛКСМ – ул. Тульская	Действующая полоса для левоповоротного маневра обустроена как локальное расширение, которое не имеет продолжения после пересечения со второстепенной улицей
ул. 50 лет ВЛКСМ – ул. Геологоразведчиков	Существенных затруднений для обустройства нет, введение отнесенного левого поворота в целом целесообразно

Таблица 2

Table 2

*Результаты сбора исходных данных  
Results of baseline data gathering*

Период времени	Ул. 50 лет ВЛКСМ								Ул. Геологоразведчиков			
	со стороны ул. Пермькова				со стороны ул. Тульской							
	Интенсивность, прив. ед./ч		Среднее значение длины транспортной очереди, прив. ед.		Интенсивность, прив. ед./ч		Среднее значение длины транспортной очереди, прив. ед.		Интенсивность, прив. ед./ч		Среднее значение длины транспортной очереди, прив. ед.	
	Прямо	Направо	Полоса 1	Полоса 2	Прямо	Налево	Полоса 1	Полоса 2	Направо	Налево	Полоса 1	Полоса 2
с 07 ч 30 мин до 08 ч 30 мин	1 347	97	5	5	959	85	1	1	211	67	1	1
с 12 ч 30 мин до 13 ч 30 мин	882	64	2	2	1 055	121	1	1	204	63	1	1
с 18 ч 00 мин до 19 ч 00 мин	788	89	2	2	1 111	140	2	2	132	54	1	1

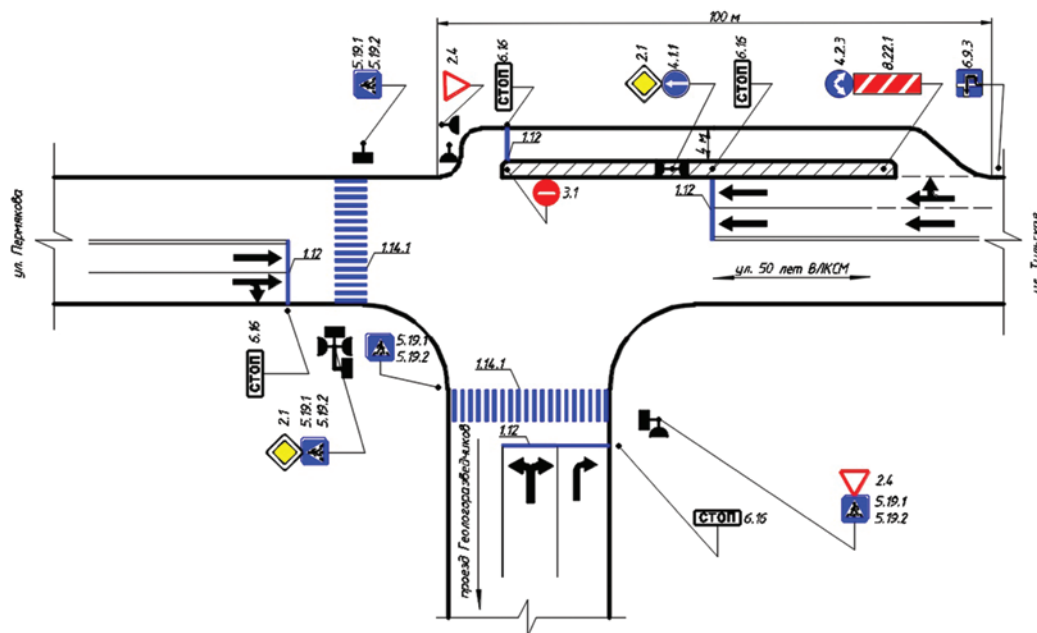


Рис. 2. Предлагаемая схема организации дорожного движения на регулируемом пересечении ул. 50 лет ВЛКСМ и ул. Геологоразведчиков с применением отнесенного левого поворота  
 Fig. 2. Proposed traffic organization scheme at the regulated intersection of 50 Let VLKSM St. and Geologorazvedchikov St. with the use of the offset left turn

На основании ГОСТ Р 52289-2019<sup>1</sup> разработана схема организации дорожного движения с отнесенным левым поворотом (рис. 2). Необходимо отметить, что данная схема является укрупненной. Следовательно, при внедрении результатов исследования может потребоваться дополнительная корректировка с учетом действующего законодательства Российской Федерации.

Дальнейшее проектирование светофорного цикла регулирования осуществлялось по методике Ф. Вебстера [3, 6, 7], в соответствии с которой ключевым показателем оценки эффективности организации дорожного движения служит средняя задержка транспортных средств, проезжающих через регулируемое пересечение:

$$\begin{cases} d_j = \frac{T_u(1-\lambda_j)^2}{2(1-\lambda_j x_j)} + \frac{x_j^2}{2Q_{j,ex}(1-x_j)} - 0,65 \left( \frac{T_u}{Q_{j,ex}} \right)^{\frac{1}{3}} x_j^{2+5\lambda_j}, \\ x_j = \frac{Q_{j,ex}}{M_{Hij} \lambda_j}. \end{cases} \quad (1)$$

где  $d_j$  – средняя задержка каждого транспортного средства  $j$ -го направления движения, с/привед. ед.;

$T_u$  – продолжительность светофорного цикла регулирования, с;

$\lambda_i$  – доля разрешающего сигнала  $i$ -й фазы светофорного цикла регулирования;

$x_j$  – степень насыщения  $j$ -го направления движения;

<sup>1</sup> ГОСТ Р 52289-2019. Технические средства организации дорожного движения. Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств = Traffic control devices. Rules of application of traffic signs, markings, traffic lights, guardrails and delineators : национальный стандарт РФ : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 декабря 2019 г. № 1425-ст : взамен ГОСТ Р 52289-2004 : дата введения 2020-04-01 / разработан ФАУ «РОСДОРНИИ» Министерства транспорта РФ. – Текст электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200170422> (дата обращения: 01.07.2023).

$Q_{j,вх}$  – интенсивность транспортного потока  $j$ -го направления движения на входе регулируемого пересечения, привед. ед./ч;

$M_{Hij}$  – поток насыщения в  $i$ -й фазе  $j$ -го направления движения транспортных средств, привед. ед./ч.

Таким образом, технологический эффект предлагаемых решений заключается в сокращении суммарного значения средней транспортной задержки всех транспортных средств, проезжающих через регулируемое пересечение:

$$\Delta T_3 = T_{31} - T_{32}, \quad (2)$$

где  $\Delta T_3$  – технологический эффект от сокращения суммарной средней задержки движения транспортных средств, полученный в результате применения отнесенного левого поворота, с;

$T_{31}$  – суммарная средняя задержка движения транспортных средств на регулируемом пересечении при действующей схеме организации дорожного движения и действующем светофорном цикле, с;

$T_{32}$  – суммарная средняя задержка движения транспортных средств после применения отнесенного левого поворота и корректировки светофорного цикла, с.

Сравнительный анализ численных значений задержки при существующей ситуации и предлагаемых изменениях представлен в таблице 3.

Благодаря сокращению суммарной средней задержки может достигаться экономический эффект. В свою очередь, он будет заключаться в сокращении расхода топлива на холостом режиме работы двигателя вследствие простоя при проезде через регулируемое пересечение. При средней стоимости топлива 50 руб./л экономия топлива в денежном эквиваленте будет составлять приблизительно 665, 923 и 994 руб. в течение утреннего, дневного и вечернего часов пик соответственно.

При этом социальный эффект от принятых мер может заключаться в снижении риска дорожно-транспортных происшествий, что будет достигаться посредством сокращения конфликтных точек за счет ликвидации левого поворота по главной дороге и перенаправления левоповоротного потока на второстепенную улицу в прямом направлении.

Экологический эффект может достигаться за счет сокращения выбросов вредных веществ CO, CH, NO<sub>x</sub> и SO<sub>2</sub>. Расчет значений выполнялся в соответствии с ГОСТ Р 56162-2019<sup>2</sup>.

Таблица 3  
Table 3

Сравнительный анализ действующей и предлагаемой схемы организации дорожного движения  
Comparative analysis of the current and proposed traffic scheme

Период времени	Суммарная средняя задержка $T_3$ при действующей схеме, с	Суммарная средняя задержка $T_3$ с отнесенным левым поворотом, с	Абсолютное отклонение $\Delta T_3$ , с	Относительное отклонение, %
с 07 ч 30 мин до 08 ч 30 мин	108 163	60 416	47 747	44
с 12 ч 30 мин до 13 ч 30 мин	107 261	40 996	66 265	61
с 18 ч 00 мин до 19 ч 00 мин	100 998	29 623	71 375	70

<sup>2</sup> ГОСТ Р 56162-2019. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Метод расчета количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферу потоками автотранспортных средств на автомобильных дорогах разной категории = Emissions of polluting substances into the atmosphere. Method for calculating the amount of pollutant emissions generated by motor vehicle flows on roads of various categories : национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 сентября 2019 г. № 694-ст : взамен ГОСТ Р 56162-2014 : дата введения 2020-01-01 / разработан АО «НИИ Атмосфера». – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200167788> (дата обращения: 01.07.2023).

По результатам расчетов, суммарное сокращение выбросов вредных веществ составит примерно 0.22, 0.3 и 0.32 кг для утреннего, дневного и вечернего часов пик соответственно.

### **Обсуждение**

Предотвращение образования транспортных заторов в городах – одна из самых актуальных и нерешенных задач современной науки и техники. Вместе с этим, не менее важно повышение безопасности дорожного движения. Одним из способов решения обеих задач может стать применение отнесенного левого поворота. Как показали результаты исследования, привлекательность данного подхода состоит в том, что при незначительной реконструкции участка улично-дорожной сети могут быть не только сокращены временные потери при перемещении, но и уменьшен риск аварийности.

Тем не менее, необходимо также отметить, что данный подход имеет ограниченное применение. Обустройство дополнительной полосы для отнесенного левого поворота возможно только при соблюдении ряда условий. Как показало исследование, данные условия в полном объеме могут выполняться только на уличных пересечениях т-образного типа. При этом далеко не на всех т-образных перекрестках целесообразно введение отнесенного левого поворота.

В качестве примера была рассмотрена возможность применения отнесенного левого поворота на перекрестке ул. 50 лет ВЛКСМ и ул. Геологоразведчиков. Безусловно, данный перекресток является далеко не самым проблемным в г. Тюмени как в части формирования транспортных заторов, так и с точки зрения аварийности. Данное регулируемое пересечение было выбрано скорее по остаточному принципу, так как в г. Тюмени не так много т-образных перекрестков со свободной и незастроенной территорией для введения дополнительной полосы. Однако даже в этом случае применение отнесенного левого поворота может принести позитивный технологический, экономический, социальный и экологический эффекты.

Но необходимо понимать, что обозначенные выше эффекты могут быть достигнуты только при соблюдении ряда ограничений: ясная видимость, отсутствие осадков, наледи и сухое дорожное покрытие. Предполагается, что в противном случае применение отнесенного левого поворота также принесет позитивные эффекты, но их численные значения могут отличаться от тех, что были получены.

### **Выводы**

В ходе исследования установлено, что одним из способов предотвращения формирования транспортных заторов на улично-дорожной сети может являться отнесенный левый поворот, который активно применяется в ряде городов Российской Федерации. По результатам анализа выявлены условия, определяющие возможность его применения.

В целях изучения возможности применения данного способа в г. Тюмени проанализирована улично-дорожная сеть и отобран перечень регулируемых пересечений для обустройства отнесенного левого поворота. В качестве наиболее подходящего уличного пересечения определен перекресток ул. 50 лет ВЛКСМ и ул. Геологоразведчиков.

На обозначенном уличном пересечении произведен сбор исходных данных интенсивности движения транспортных потоков и транспортной очереди. Разработана схема организации дорожного движения с применением отнесенного левого поворота. Проектирование светофорного цикла регулирования для новой схемы осуществлялось по методике Фрэнка Вебстера.

Как показала аналитическая оценка, применение результатов исследования позволит сократить суммарное среднее время задержки всех транспортных средств, проезжающих через регулируемое пересечение, на 44–70 % в зависимости от времени часа пик. В свою очередь это позволит уменьшить расход топлива автомобилей на холостом режиме работы (от 665 до 994 руб.) и сократить суммарный выброс вредных веществ (от 0.22 до 0.32 кг).



**Благодарности.** Исследование выполнено в рамках НИОКРТ «Повышение эффективности работы транспортной инфраструктуры нефтегазового комплекса (Reg. № 123062900114-1, 26.06.2023-31.12.2024)» за счет гранта Некоммерческой организации «Благотворительный фонд «ЛУКОЙЛ» для молодых преподавателей.

**Acknowledgements.** The research was carried out within the framework of the R&D "Improving the efficiency of the transport infrastructure of the oil and gas complex (Reg. No. 123062900114-1, 06/26/2023-12/31/2024)" at the expense of a grant from the non-profit organization "LUKOIL" Charity Fund for Young Teachers.

### Библиографический список

1. Федеральная служба государственной статистики : сайт. – URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 22.07.2023). – Текст : электронный.
2. Матигорова, О. С. Вопросы переустройства съездов развязок с позиции обеспечения безопасности движения / О. С. Матигорова, Р. В. Андронов. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-1-67-77. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 1 (103). – С. 67–77.
3. Морозов, В. В. Закономерности изменения характеристик транспортных потоков в городах : монография / В. В. Морозов, Д. А. Захаров, С. А. Ярков. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2020. – 165 с. – Текст : непосредственный.
4. Транспортные задержки с учетом геометрических особенностей перекрестков городских улиц / С. А. Ярков, С. А. Эртман, В. В. Морозов, Г. Н. Морозов. – Текст : непосредственный // Транспорт и машиностроение Западной Сибири. – 2019. – № 1. – С. 52–58.
5. Branston, D. Some factors affecting the capacity of signalized intersection / D. Branston. – Текст : непосредственный // Traffic Engineering and Control. – 1979. – Vol. 20, No 8–9. – P. 390–396.
6. Gerlough, D. L. Traffic Flow Theory: a Monograph / D. L. Gerlough, J. H. Huber. – Washington, DC : Transportation Research Board National Research Council, 1975. – 233 p. – Текст : непосредственный.
7. Webster, F.V. Traffic Signals / F.V. Webster, B. M. Cobbe // Road Research Technical Paper. No 56. – London : H.M.S.O., 1966. – 111 p. – Текст : непосредственный.
8. Захаров, Н. С. Закономерности формирования количества легковых автомобилей на улично-дорожной сети города / Н. С. Захаров, Е. Ф. Бояркина. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2011. – 160 с. – Текст : непосредственный.
9. Пространственные и временные показатели концентрации транспортного потока в задачах управления дорожным движением / В. В. Морозов, Д. В. Бобров, С. В. Подлесных, С. В. Смолин. – Текст : непосредственный // Организация и безопасность дорожного движения : материалы XI международной научно-практической конференции: в 2-х томах, Тюмень, 15 марта 2018 года. Том 1. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2018. – С. 333–335.
10. Игнатьюгин, В. А. Сбалансированность транспортного обслуживания населения городов: основные подходы / В. А. Игнатьюгин, А. И. Петров. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-2-64-78. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 2 (104). – С. 64–78.
11. Исследования условий движения на пересечении ул. Маяковского и ул. Аранской при устройстве многофункционального комплекса «Червенский» в г. Минске / Д. В. Капский, Д. В. Мозалевский, В. Н. Кузьменко [и др.]. – Текст : непосредственный // Автомобильный транспорт Дальнего Востока. – 2014. – № 1. – С. 187–199.
12. Яндекс Карты – транспорт, навигация, поиск мест : сайт. – URL: <http://yandex.ru/maps> (дата обращения: 22.07.2023). – Текст : электронный.

## References

1. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki. (In Russian). Available at: <https://rosstat.gov.ru/> (accessed 22.07.2023).
2. Matigorova, O. S., & Andronov, R. V. (2023). Issues of rearrangement of road interchange exits for the traffic safety. *Architecture, Construction, Transport*, (1(103)), pp. 67-77. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-1-67-77.
3. Morozov, V. V., Zakharov, D. A., & Iarkov, S. A. (2020). Zakonomernosti izmeneniya kharakteristik transportnykh potokov v gorodakh. Tyumen, Industrial University of Tyumen Publ., 165 p. (In Russian).
4. Iarkov, S. A., Ertman, S. A., Morozov, V. V., & Morozov, G. N. (2019). Transport delays taking into account the geometric features of city street intersections. *Transport i mashinostroenie Zapadnoy Sibiri*, (1), pp. 52-58. (In Russian).
5. Branston, D. (1979). Some factors affecting the capacity of signalized intersection. *Traffic Engineering and Control*, 20(8-9), pp. 390-396. (In English).
6. Gerlough, D. L., & Huber, J. H. (1975). *Traffic Flow Theory: a Monograph*. Washington, DC, Publ. Transportation Research Board National Research Council, 233 p. (In English).
7. Webster, F. V., & Cobbe, B. M. (1966). *Traffic Signals*. Road Research Technical Paper. No 56. London, Publ. H.M.S.O., 111 p. (In English).
8. Zakharov, N. S., & Boyarkina, E. F. (2011). Zakonomernosti formirovaniya kolichestva legkovykh avtomobiley na ulichno-dorozhnoy seti goroda. Tyumen, Industrial University of Tyumen Publ., 160 p. (In Russian).
9. Morozov, V. V., Bobrov, D. V., Podlesnykh, S. V., & Smolin, S. V. (2018). Prostranstvennyye i vremennyye pokazateli kontsentratsii transportnogo potoka v zadachakh upravleniya dorozhnym dvizheniem. Organizatsiya i bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya: materialy XI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Tyumen, March, 15. Tyumen, Industrial University of Tyumen Publ., 1, pp. 333-335. (In Russian).
10. Ignatyugin, V. A., & Petrov, A. I. (2023). Balance of transport services for the population of cities: basic approaches. *Architecture, Construction, Transport*, (2(104)), pp. 64-78. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-2-64-78.
11. Kapskiy, D. V., Mozalevskiy, D. V., Kuz'menko, V. N., Polkhovskaya A. S., Ermakova, N. V., & Artyushevskaya, N. V. (2014). Issledovaniya usloviy dvizheniya na peresechenii ul. Mayakovskogo i ul. Aranskooy pri ustroystve mnogofunktsional'nogo kompleksa "Chervenskiy" v g. Minske. *Avtomobil'nyy transport Dal'nego Vostoka*, (1), pp. 187-199. (In Russian).
12. Yandex Karty – transport, navigatsiya, poisk mest. (In Russian). Available at: <http://yandex.ru/maps> (accessed 22.07.2023).

### Сведения об авторе

Морозов Вячеслав Валерьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры транспортных и технологических систем, Тюменский индустриальный университет, e-mail: morozov1990\_72@mail.ru, ORCID 0000-0001-6840-1247

### Information about the author

Viacheslav V. Morozov, Candidate in Engineering, Associate Professor at the Department of Transport and Technological Systems, Industrial University of Tyumen, e-mail: morozov1990\_72@mail.ru, ORCID 0000-0001-6840-1247

*Получена 13 июля 2023 г., одобрена 28 июля 2023 г., принята к публикации 28 сентября 2023 г.  
Received 13 July 2023, Approved 28 July 2023, Accepted for publication 28 September 2023*

# МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ПЕРЕСЕЧЕНИЯ В СОСТАВЕ МАГИСТРАЛЬНОЙ АСУДД

Р. В. Андронов, Е. Э. Левверенц  
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

## MODELING OF AN ADAPTIVE OPERATION MODE TRAFFIC LIGHT INTERSECTION IN A MAIN AUTOMATED TRAFFIC CONTROL SYSTEM

Roman V. Andronov, Evgeny E. Leverents  
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Аннотация.** Для принятия управленческих решений по организации дорожного движения на городских улицах рекомендуется применять моделирование с помощью специализированных программных продуктов. Объектом исследования является регулируемое пересечение ул. Тобольский тракт и ул. Судоремонтной в г. Тюмени. В процессе имитационного микромоделирования с помощью программного продукта SmartAdaptive+ при потенциальной реализации адаптивного светофорного регулирования показано, что существующая в настоящее время схема координированного управления может быть дополнена адаптивным управлением на одном из узлов для минимизации задержек как по главному, так и по пересекаемому направлению. Методом статистических испытаний были произведены расчет и сравнение задержек транспортных средств и максимальной длины очереди при адаптивном и жестком регулировании. При максимальной продолжительности разрешающей фазы 75 с по главному направлению и 20 с по второстепенному в течение дня будут наблюдаться наименьшие задержки по обоим направлениям пересечения.

**Abstract.** It is recommended to use modelling with the help of specialized software products to make managerial decisions about traffic control on urban streets. The object of the study is the regulated intersection of Tobolskiy Trakt St. and Sudoremontnaya St. in Tyumen. During the simulation micromodelling using the SmartAdaptive+ software product for potential implementation of adaptive traffic light control, we show that the current scheme of coordinated control can be supplemented with adaptive control at one of the nodes to minimize delays in both the main and crossing directions. Vehicle delays and maximum queue lengths under adaptive and tight regulation were calculated and compared using the statistical test method. With a maximum permissive phase of 75 s on the major direction and of 20 s on the minor direction, the shortest delays will be observed on both directions of intersection during the day.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, улично-дорожная сеть, транспортные потоки, адаптивное светофорное регулирование, задержки транспортных средств, длина очереди

**Key words:** simulation modelling, street-road network, traffic flows, adaptive traffic light control, vehicle delays, queue lengths

**Для цитирования:** Андронов, Р. В. Моделирование адаптивного режима работы регулируемого пересечения в составе магистральной АСУДД / Р. В. Андронов, Е. Э. Лаверенц. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-81-88. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 3 (105). – С. 81–88.

**For citation:** Andronov, R. V., & Leverents, E. E. (2023). Modeling of an adaptive operation mode traffic light intersection in a main Automated traffic control system. Architecture, Construction, Transport, (3(105)), pp. 81-88. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-81-88.

## Введение

Российская Федерация выходит на так называемое «плато» автомобилизации, при котором рост автопарка существенно замедляется, а объем движения на городской улично-дорожной сети при этом остается стабильным. Наблюдаемая динамика часовой интенсивности движения в уже застроенных районах также имеет стабильный характер. Для обеспечения основных потребительских свойств улиц и дорог требуется установка большого количества светофорных объектов, которые ограничивают пропускную способность улиц и, соответственно, рост интенсивности движения.

Наличие большого количества светофорных объектов приводит к росту задержек транспортных средств и снижению общей скорости движения. Для нивелирования данного эффекта и управления такими объектами требуется активное применение магистральных и сетевых автоматизированных систем управления дорожным движением (АСУДД) [1, 2]. Это смогло бы значительно улучшить качество работы улично-дорожной сети и реализовать концепцию «города, удобного для жизни» [3].

Применяемая в г. Тюмени АСУДД Spectrum 2.0 позволяет осуществлять как координированное, так и адаптивное управление светофорным регулированием. Вводная информация о состоянии транспортного потока поступает в систему с видеодетекторов TrafficCam, установленных на

основных пересечениях магистральных улиц города (рис. 1).

В магистральных АСУДД, оптимизирующих движение вдоль улицы, предпочтение отдается координированному управлению, в частности, регулированию по «зеленой волне». На локальных, не связанных светофорных объектах (например, ул. Тобольский тракт – ул. Малышева, ул. Тобольский тракт – ул. Т. Чаркова) делаются попытки применить адаптивное регулирование, заключающееся в самом распространенном его варианте – пропуске сформировавшейся очереди автомобилей и остального движущегося транспортного потока до появления разрыва, когда направление движения остается незанятым [4]. После этого осуществляется переключение сигнала светофора. При практически непрерывном движении транспортного потока к пересечению переключение сигнала происходит принудительно по максимально заложенной продолжительности разрешающей фазы, как при жестком регулировании.

## Объект и методы исследования

Объектом исследования в статье является регулируемое пересечение ул. Тобольский тракт и ул. Судоремонтной вместе с подходами в г. Тюмени.

На ул. Тобольский тракт на большинстве пересечений установлены видеодетекторы TrafficCam, фиксирующие факт прохода транспорт-



Рис. 1. Мониторинг транспортного потока и фиксация занятости полос движения системой Spectrum 2.0 через видеодетекторы TraffiCam  
 Fig. 1. Traffic flow monitoring and lane occupancy fixation by Spectrum 2.0 via TraffiCam video detectors

ных средств по полосам движения и занятость полосы [5]. На всем протяжении улицы работают два адаптивно управляемых пересечения – с ул. Малышева и ул. Т. Чаркова, на остальных реализована магистральная АСУДД с координированным регулированием.

Принцип координированного регулирования заключается в одинаковой продолжительности светофорного цикла на пересечениях улицы и согласованном времени зажигания разрешающей фазы для главного направления. Это дает эффект безостановочного прохода основной массы транспортных средств на зеленый сигнал светофора, но приводит в отдельных случаях к повышенным задержкам автомобилей, двигающихся по пересекающимся направлениям с большой интенсивностью движения.

В исследовании производится моделирование дорожно-транспортной ситуации в будний день при условии нормативного состояния до-

рожных условий для двух временных интервалов как в час пик, так и вне его.

### Экспериментальная часть

В настоящее время при внедрении АСУДД требуется производить моделирование ее работы с оценкой эффективности. Для этого используются в основном зарубежные программные продукты, такие как VISSIM, причем дополнительные модули по моделированию адаптивного управления (например, VAP/VisVAP) устанавливаются за отдельную плату.

На кафедре автомобильных дорог и аэродромов Тюменского индустриального университета авторами создана модель, реализованная в программном комплексе SmartAdaptive+ [6]. В данной модели реализован принцип работы вероятностных автоматов. Модель использует в своей основе положения [2, 7–9], в которых подходящий поток моделируется как по распределе-

Таблица 1  
Table 1

Исходные данные при жестком регулировании (движение в одном направлении)  
Initial data in case of tight control (one-way traffic)

Период времени	Интенсивность движения		Общая продолжительность:	
	ул. Тобольский тракт, авт./ч	ул. Судоремонтная, авт./ч	светофорного цикла, с	горения разрешающего сигнала, с (главное/пересекаемое)
С 10.00 до 11.00	1 147	533	102	48/20
С 17.00 до 18.00	850	366	102	48/20

нию Пуассона (только для однополосного потока интенсивностью до 300 авт./ч), так и по бета-распределению с ограничением прохода максимально возможного количества транспортных средств за единичное время. В нестационарном потоке параметры для пачек автомобилей и остального потока задаются отдельно.

Пропускная способность стоп-линии узла и ее статистические характеристики рассчитывались по ОДМ 218.2.020-2012<sup>1</sup> и [9, 10]. Шаг моделирования составлял 5 с, что в основном соответствует интервалу, определяющему наличие разрыва в потоке.

Эффективность работы адаптивных светофорных алгоритмов, действующих по принципу поиска разрыва в потоке на изолированно работающих пересечениях (10–50 %) [1, 2], общепризнана. Однако возникает вопрос определения их эффективности/неэффективности при работе с магистральной АСУДД с координированным управлением, т. к. прибытие больших пачек автомобилей сразу после включения запрещающего сигнала оказывает негативный эффект и приводит к утомляемости водителей.

Для этого в исследовании моделировались различные сценарии с изменением максимальной продолжительности разрешающего сигнала.

### Результаты

В работе было произведено моделирование с многократным проигрышем (100–150 раз) развития дорожно-транспортной ситуации на рассматриваемом пересечении (по методу статистических испытаний Монте-Карло). По результатам моделирования можно сделать предварительные выводы (рис. 2, 3 и табл. 1, 2).

При жестком регулировании (рис. 2) накапливаемые очереди отмечаются через одинаковое время. В правой части рис. 3 (адаптивное регулирование) наблюдается основной недостаток применения адаптивного регулирования при нахождении рядом других светофорных объектов. Из-за небольшого расстояния между светофорами пачки автомобилей в основном сохраняют свою целостность [11], и автомобили, движущиеся в них, вынуждены периодически останавливаться на запрещающий сигнал светофора рассматриваемого пересечения. В этом случае предлагается произвести моделирование при различных комбинациях максимальной продолжительности разрешающего сигнала (предлагается 75 и 100 с).

Как видно из таблиц, адаптивное регулирование может применяться на рассматриваемой улице в основном вне часа пик. В час пик при вы-

<sup>1</sup> ОДМ 218.2.020-2012. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог : издание официальное : внесен Управлением эксплуатации и сохранности автомобильных дорог Федерального дорожного агентства / разработан АНО «Институт проблем безопасности движения», Московским автомобильно-дорожным государственным техническим университетом (МАДИ), Иркутским государственным техническим университетом, Тихоокеанским государственным университетом, ФГУП «РОСДОРНИИ», ООО «ИНЭМДорТранс». – Москва : Информавтодор, 2012. – 148 с. – Текст : непосредственный.

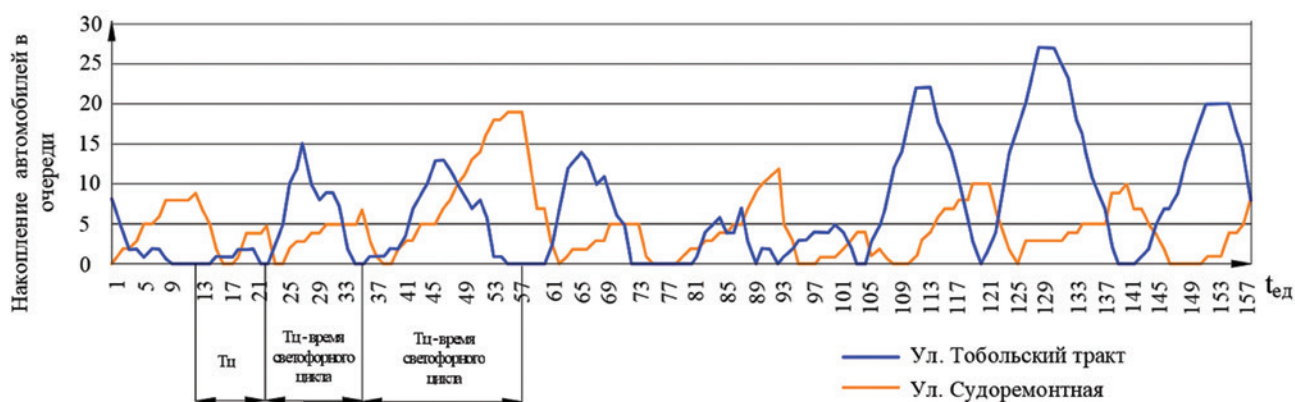


Рис. 2. Участок циклограммы при жестком регулировании (шаг расчета  $t_{ед} = 5$  с). Время 17.00–18.00  
 Fig. 2. Section of the cyclogram under tight control (calculation step  $t_{un} = 5$  s). Time 17.00–18.00

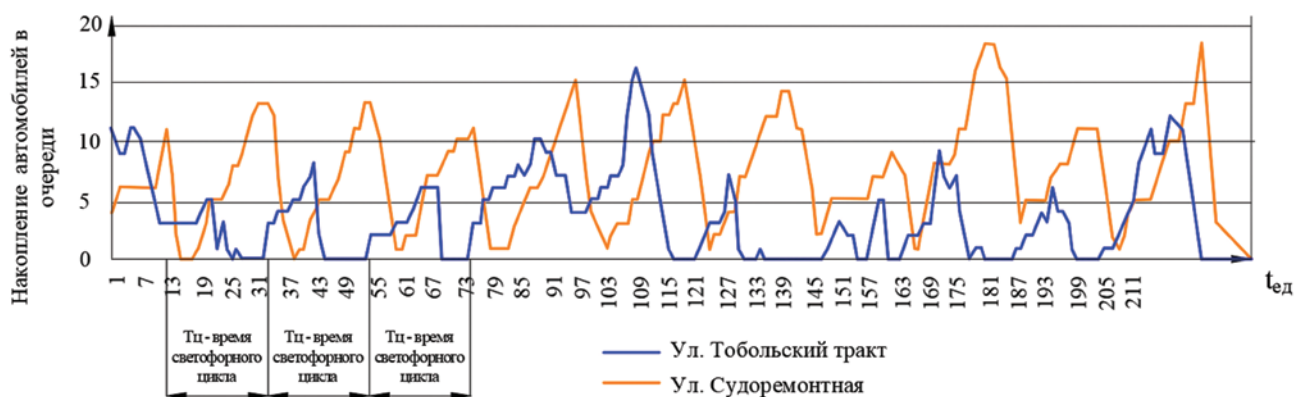


Рис. 3. Участок циклограммы при адаптивном регулировании (шаг расчета  $t_{ед} = 5$  с). Время 17.00–18.00. Максимальная продолжительность разрешающего сигнала для двух направлений 50 и 20 с соответственно  
 Fig. 3. Section of the cyclogram under adaptive control (calculation step  $t_{un} = 5$  s). Time 17.00–18.00. Maximum duration of the enable signal 50 s and 20 s for the two directions respectively

сокой интенсивности движения алгоритм с предельным временем переключения сигналов 50 с по обоим направлениям наименее эффективен, т. к. в этом случае будет наблюдаться серьезная десинхронизация с работой остальной АСУДД по ул. Тобольский тракт.

При более детальном анализе можно выделить некоторые алгоритмы, которые окажут положительный эффект практически на все дневное время. Это алгоритм с максимальной продолжительностью разрешающего сигнала 75 с по главному направлению и 20 с по второстепенному. Эффективность применения данного алгоритма на главной улице заключается в том, что он при сравнительно небольшом пре-

вышении максимальной продолжительности разрешающего сигнала позволяет полностью пропустить пачки автомобилей, посылаемые с предыдущих светофорных объектов, и переключить сигнал светофора по факту появления разрыва в потоке.

### Выводы

На примере моделирования пересечения ул. Тобольский тракт и ул. Судоремонтной в г. Тюмени можно сделать ряд выводов и рекомендаций:

1. Для минимизации задержек транспортных средств по пересекающимся направлениям магистральной координированной АСУДД

Таблица 2  
Table 2

Результаты моделирования движения по главному направлению с интенсивностью 1 147 авт./ч, по второстепенному 533 авт./ч  
Results of traffic modeling on the main direction with an intensity of 1 147 cars per hour, on the secondary direction 533 cars per hour

Продолжительность цикла, с		Среднее время задержки по направлениям, с		Изменение по сравнению с жестким регулированием, %		
		главное	пересекаемое			
<b>Текущая ситуация, жесткое регулирование</b>						
<b>102</b>		<b>19</b>	<b>57</b>	–	–	
<b>Адаптивное регулирование</b>						
При максимальной продолжительности разрешающего сигнала, главное/второстепенное, с	50/20	<b>80</b>	<b>19</b>	<b>39</b>	3 %	–30 %
	75/20	<b>81</b>	<b>16</b>	<b>46</b>	–16 %	–19 %
	100/20	<b>83</b>	<b>16</b>	<b>46</b>	–12 %	–18 %
	50/50	<b>86</b>	<b>23</b>	<b>34</b>	23 %	–40 %
	75/50	<b>91</b>	<b>20</b>	<b>37</b>	9 %	–35 %
	100/50	<b>95</b>	<b>20</b>	<b>38</b>	3 %	–30 %

Таблица 3  
Table 3

Результаты моделирования движения по главному направлению с интенсивностью 850 авт./ч, по второстепенному 366 авт./ч  
Results of traffic modeling on the main direction with an intensity of 850 cars per hour, on the secondary direction 366 cars per hour

Продолжительность цикла, с		Среднее время задержки по направлениям, с		Изменение по сравнению с жестким регулированием, %		
		главное	пересекаемое			
<b>Текущая ситуация, жесткое регулирование</b>						
<b>102</b>		<b>19</b>	<b>44</b>	–	–	
<b>Адаптивное регулирование</b>						
При максимальной продолжительности разрешающего сигнала, главное/второстепенное, с	50/20	<b>51</b>	<b>17</b>	<b>25</b>	–14 %	–43 %
	75/20	<b>51</b>	<b>16</b>	<b>27</b>	–16 %	–39 %
	100/20	<b>49</b>	<b>17</b>	<b>26</b>	–13 %	–40 %
	50/50	<b>49</b>	<b>17</b>	<b>25</b>	–13 %	–44 %
	75/50	<b>52</b>	<b>17</b>	<b>26</b>	–13 %	–40 %
	100/50	<b>54</b>	<b>17</b>	<b>25</b>	–14 %	–42 %

- одним из решений может являться адаптивное светофорное регулирование на наиболее загруженном пересечении улицы с обособленной максимальной продолжительностью разрешающего сигнала во избежание десинхронизации работы с остальной АСУДД и увеличения задержек транспортных средств.
- При принятии соответствующего решения требуется смоделировать работу рассматриваемого участка методом статистических испытаний для оценки средней величины задержки и статистического разброса параметров очереди.
  - Для рассматриваемого в статье пересечения рекомендуется применить режим адаптивного регулирования с установкой максимальной продолжительности разрешающего сигнала при условии занятости полос движения для главного направления – 75 с, для второстепенного – 20 с. В этом случае будут наблюдаться наименьшие задержки в течение дня по обоим направлениям.



### Библиографический список

1. Кременец, Ю. А. Технические средства организации дорожного движения : учебник для вузов / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский, М. Б. Афанасьев. – Москва : Академкнига, 2005. – 279 с. – Текст : непосредственный.
2. Петров, В. В. Автоматизированные системы управления дорожным движением в городах / В. В. Петров. – 3-е издание, стереотипное. – Омск : Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2021. – 99 с. – Текст : непосредственный.
3. Вучик, В. Р. Транспорт в городах, удобных для жизни / Вукан Р. Вучик ; пер. с англ. А. Калинина под науч. ред. М. Блинкина. – Москва : Территория будущего, 2011. – 574 с.
4. Морозов, В. В. Влияние занятости полосы на интенсивность движения транспортных средств / В. В. Морозов, С. А. Янков. – Текст : непосредственный // Прогрессивные технологии в транспортных системах : сборник статей XIII международной научно-практической конференции, Оренбург, 15–17 ноября 2017 года. – Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2017. – С. 180–184.
5. Морозов, В. В. Повышение пропускной способности регулируемых пересечений путем использования Автоматизированной системы управления дорожным движением в г. Тюмени / В. В. Морозов, С. А. Янков. – Текст : непосредственный // Инновации и исследования в транспортном комплексе : материалы Международной научно-практической конференции, Курган, 4–5 июня 2015 года. – Курган : Курганский институт железнодорожного транспорта, 2015. – С. 207–213.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022611007 Российская Федерация. Система моделирования автомобильного движения через транспортное пересечение в разных режимах регулирования (SmartAdaptive+) : № 2022610123 : заявл. 11.01.2022 : опубл. 18.01.2022 / Р. В. Андронов, В. О. Доманский, Е. Э. Леверенц ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет». – Текст : непосредственный.
7. Власов, А. А. Теория транспортных потоков : монография / А. А. Власов. – Пенза : Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2014. – 123 с. – ISBN 978-5-9282-1173-8. – Текст : непосредственный.
8. Исследование транспортных потоков городской улично-дорожной сети на стационарность методом дисперсионного анализа / Р. В. Андронов, Е. Э. Леверенц, В. О. Доманский, Б. П. Елькин. – Текст : непосредственный // Научно-технический вестник Поволжья. – 2022. – № 9. – С. 7–11.
9. Андронов, Р. В. Моделирование транспортных пересечений городских улиц с адаптивным регулированием дорожного движения / Р. В. Андронов, Е. Э. Леверенц, Т. В. Мальцева. – DOI 10.21684/2411-7978-2022-8-1-144-160. – Текст : непосредственный // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2022. – Т. 8, № 1 (29). – С. 144–160.
10. Клинковштейн, Г. И. Организация дорожного движения : учебник для вузов / Г. И. Клинковштейн, М. Б. Афанасьев. – 5-е издание, переработанное и дополненное. – Москва : Транспорт, 2001. – 247 с. – Текст : непосредственный.
11. Моделирование процесса распада координированной пачки автомобилей при движении по перегону магистральной улицы / Г. М. Кухаренок, Д. В. Капский, Д. В. Навой, Д. В. Рожанский. – Текст : непосредственный // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2010. – № 6. – С. 51–57.

### References

1. Kremenets, Yu. A., Pecherskiy, M. P., & Afanas'ev, M. B. (2005). *Tekhnicheskie sredstva organizatsii dorozhnogo dvizheniya: uchebnik dlya vuzov*. Moscow, Akademkniga Publ., 279 p. (In Russian).

2. Petrov, V. V. (2021). Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya dorozhnym dvizheniem v gorodakh. 3<sup>rd</sup> edition. Omsk, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) Publ., 99 p. (In Russian).
3. Vuchic, V. R. (1999). Transportation for Livable Cities. New York, Publ. Routledge, 378 p. (In English).
4. Morozov, V. V., & Yarkov, S. A. (2017). Vliyaniye zanyatosti polosy na intensivnost' dvizheniya transportnykh sredstv. Progressivnyye tekhnologii v transportnykh sistemakh: sbornik statey XIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, November, 15-17. Orenburg, Orenburg State University Publ., pp. 180-184. (In Russian).
5. Morozov, V. V., & Yarkov, S. A. (2015). Povysheniye propusknoy sposobnosti reguliruemykh peresecheniy putem ispol'zovaniya Avtomatizirovannoy sistemy upravleniya dorozhnym dvizheniem v g. Tyumeni. Innovatsii i issledovaniya v transportnom komplekse: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, June, 4-5. Kurgan, Kurgan Institute of Railway Transport Publ., pp. 207-213. (In Russian).
6. Andronov, R. V., Domanskiy, V. O., & Leverents, E. E. Sistema modelirovaniya avtomobil'nogo dvizheniya cherez transportnoye peresecheniye v raznykh rezhimakh regulirovaniya (SmartAdaptive+). State Registration Certificate for Computer Software No 2022610123. Applied: 11.01.2022. (In Russian).
7. Vlasov, A. A. (2014). Teoriya transportnykh potokov: monografiya. Penza, Penza State University of Architecture and Construction Publ., 123 p. (In Russian).
8. Andronov, R. V., Leverents, E. E., Domanskiy, V. O., & Elkin, B. P. (2022). Research of traffic flows of the street network for stationarity by the method of dispersion analysis. Scientific and technical Volga region bulletin, (9), pp. 7-11. (In Russian).
9. Andronov, R. V., Leverents, E. E., & Maltseva, T. V. (2022). Modeling transport intersections of city streets with adaptive traffic control. Tyumen state university herald. Physical and mathematical modeling. Oil, gas, energy, 8(1(29)), pp. 144-160. (In Russian).
10. Klinkovshcheyn, G. I., & Afanas'ev, M. B. (2001). Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya: uchebnik dlya vuzov. 5<sup>th</sup> edition, revised. Moscow, Transport Publ., 247 p. (In Russian).
11. Kuharenok, G. M., Kapsky, D. V., Navoj, D. V., & Rozhansky, D. V. (2010). Disintegration process modeling of coordinated automotive pack while moving along space interval of main street. Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta, (6), pp. 51-57. (In Russian).

#### **Сведения об авторах**

Андронов Роман Валерьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Тюменский индустриальный университет, e-mail: andronovrv@tyuiu.ru

Леверенц Евгений Эдуардович, старший преподаватель кафедры строительной механики, Тюменский индустриальный университет, e-mail: leverenz72@gmail.com

#### **Information about the authors**

Roman V. Andronov, Associate Professor at the Department of Roads and Airfields, Industrial University of Tyumen, e-mail: andronovrv@tyuiu.ru

Evgeny E. Leverents, Senior Lecturer at the Department of Structural Mechanics, Industrial University of Tyumen, e-mail: leverenz@gmail.com

*Получена 01 сентября 2023 г., одобрена 14 сентября 2023 г., принята к публикации 28 сентября 2023 г.  
Received 01 September 2023, Approved 14 September 2023, Accepted for publication 28 September 2023*

# РАСЧЕТ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ИЗ ТУРБИНЫ С ИНТЕГРИРОВАННЫМ СОПЛОМ ЛАВАЛЯ НА ВЫХОДЕ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО НАПЫЛЕНИЯ

Д. Е. Писарев, С. И. Митрохин  
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

## CALCULATION OF AIRFLOW SPEED FROM A TURBINE WITH AN INTEGRATED LAVAL NOZZLE AT THE OUTLET FOR METAL COATING BY COLD SPRAYING METHOD

Dmitry E. Pisarev, Sergey I. Mitrokhin  
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Аннотация.** В данной работе была поставлена задача проверить целесообразность использования устройства, обеспечивающего подачу воздушного потока в канал сопла Лавалья для обеспечения нанесения металлического покрытия методом холодного напыления. В качестве устройства, обеспечивающего подачу воздушного потока в канал сопла Лавалья, была рассмотрена турбина с интегрированным соплом Лавалья на выходе. Дано описание применяемого при проведении расчетов оборудования и экспериментального исследования, представлен процесс газодинамического расчета выходной скорости воздушного потока, нагнетаемого крыльчаткой турбины, и результаты данного расчета с приведением точных показателей. Получены функци-

**Abstract.** The goal of this work was to test the practicability of using a device that provides airflow into the Laval nozzle channel to enable the application of metal coating by cold spraying. A turbine with an integrated Laval nozzle at the outlet was considered as a device to provide airflow into the Laval nozzle channel. The authors describe the equipment used in the calculations and the experimental study, the process of gas-dynamic calculation of the output velocity of the airflow injected by the turbine impeller and the results of this calculation with precise indices. As a result, functional dependences of the indicators that provide the possibility of using the turbine as a source of airflow have been obtained, and a conclusion about the inexpediency of using a

ональные зависимости показателей, от которых напрямую зависит возможность использования турбины в качестве источника воздушного потока, и сформирован вывод о нецелесообразности использования турбины с интегрированным соплом Лавалья на выходе для обеспечения возможности нанесения металлического покрытия методом холодного напыления.

**Ключевые слова:** холодное напыление, газодинамический расчет, сопло Лавалья, улитка компрессора, SolidWorks Flow Simulation

turbine with an integrated Laval nozzle at the outlet to provide the possibility of metal coating by cold spraying has been formed.

**Key words:** cold spraying, gas-dynamic calculation, Laval nozzle, compressor scroll, SolidWorks Flow Simulation

**Для цитирования:** Писарев, Д. Е. Расчет скорости воздушного потока из турбины с интегрированным соплом Лавалья на выходе для нанесения металлического покрытия методом холодного напыления / Д. Е. Писарев, С. И. Митрохин. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-89-95. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 3 (105). – С. 89–95.

**For citation:** Pisarev, D. E., & Mitrokhin, S. I. (2023). Calculation of airflow speed from a turbine with an integrated Laval nozzle at the outlet for metal coating by cold spraying method. *Architecture, Construction, Transport*, (3(105)), pp. 89-95. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-89-95.

## Введение

Для нанесения металлического покрытия методом холодного напыления необходимо соблюдение нескольких условий. Данная проблематика поднималась многими исследователями, для ее тщательного разбора был изучен ряд литературных источников, посвященных различным аспектам этой темы: от основ теории работы и движения газов [1], механики газов при истечении из сопел [2–4] до вопросов нанесения металлического покрытия, в том числе методом холодного напыления [5–6]. Для проведения данного исследования возникла необходимость дополнительного изучения возможностей программного модуля SolidWorks Flow Simulation [7].

В настоящей работе рассмотрен вариант обеспечения одного из условий, а именно – необходимой скорости воздушного потока путем создания установки, которая будет источником воздушного потока. Чтобы нанести металлическое покрытие методом холодного напыления, требуется достижение скорости воздушного потока 500 м/с. Для этого используется сопло Лава-

ля – газовый канал особого профиля, имеющий сужение для изменения скорости проходящего по нему газового потока. Также требуется обеспечение скорости воздушного потока до того, как он попадет в канал сопла Лавалья, для этого используется источник воздушного потока. В качестве последнего было принято решение использовать турбину (компрессор) с интегрированным соплом Лавалья на выходе.

Процесс нанесения металлического покрытия методом холодного напыления, геометрические параметры сопла Лавалья, используемого в данной установке, были рассмотрены в других исследованиях [8–10].

Принцип работы данного источника воздушного потока заключается в следующем: при вращении вала, на котором установлена крыльчатка, воздушные массы из-за высокой скорости вращения крыльчатки засасываются в специальный канал в корпусе. В данном канале воздушный поток ускоряется и под давлением подается в сопло Лавалья, которое, в свою очередь, повышает скорость воздушного потока до сверхзвуковых скоростей.

### Объект и методы исследования

Для проверки возможности достижения необходимой скорости воздушного потока на выходе из сопла Лавалья была спроектирована 3D-модель воздушной системы устройства для нанесения металлического покрытия методом холодного напыления (рис. 1). Она представляет собой турбину с интегрированным соплом Лавалья и состоит из вала, на котором располагается крыльчатка, транспортирующая воздушный поток по каналу внутри корпуса к соплу Лавалья, который, в свою очередь, должен увеличивать скорость воздушного потока до сверхзвуковых скоростей за счет специальной геометрии канала внутри сопла.

Для расчета скорости воздушного потока на выходе из сопла Лавалья было принято решение использовать трехмерную модель вышеописанной воздушной системы в программном модуле SolidWorks Flow Simulation для моделирования потока газа, транспортируемого по каналу внутри корпуса, а также выходящего из сопла Лавалья.

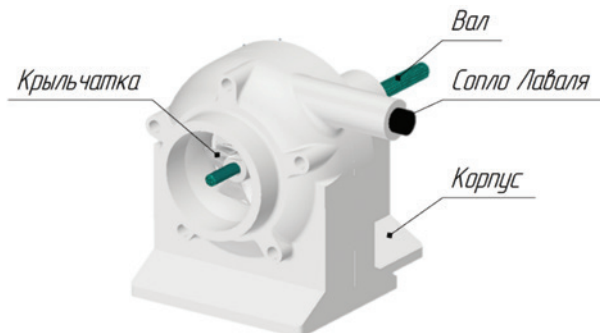


Рис. 1. 3D-модель воздушной системы  
Fig. 1. 3D model of the air system



Рис. 2. Упрощенная модель улитки  
Fig. 2. Simplified scroll model

### Экспериментальная часть

Среда SolidWorks Flow Simulation предназначена для гидродинамического расчета трехмерных моделей, выполненных в программном модуле SolidWorks или импортированных из других моделей САПР, путем моделирования потоков жидкости и газа. Изначально, чтобы приступить к расчету, была упрощена модель улитки турбины для облегчения проведения расчета (рис. 2).

Была изменена геометрия корпуса, но при этом воздушный канал внутри улитки остался неизменным, также был удален вал, на котором фиксировалась крыльчатка.

В качестве входных параметров были взяты угловые скорости воздуха при попадании в канал улитки (точные значения представлены в таблице 1), которые соответствуют скоростям вращения вала. Скорости вращения вала варьируются от 3 000 до 12 000 об/мин. Далее необходимо задать область вращения, а также цель расчета – достижение максимальной скорости – и произвести генерацию газодинамического потока.

### Результаты

Для наглядного отображения изменения скорости потока при его течении по каналу корпуса турбины на рис. 3 представлен результат газодинамического расчета турбины с интегрированным соплом Лавалья на выходе, входные параметры при данном расчете – скорость вращения вала с установленной на нем крыльчаткой – 12 000 об/мин.

В таблице 1 отображены результаты газодинамического расчета турбины с интегрированным соплом Лавалья при задании различной скорости вращения вала. Угловая скорость была получена по формуле:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30},$$

где  $\omega$  – угловая скорость воздуха при попадании в улитку, рад/с;

$n$  – скорость вращения вала, об/мин.

Радиальная скорость воздуха при попадании в улитку и скорость воздушного потока на

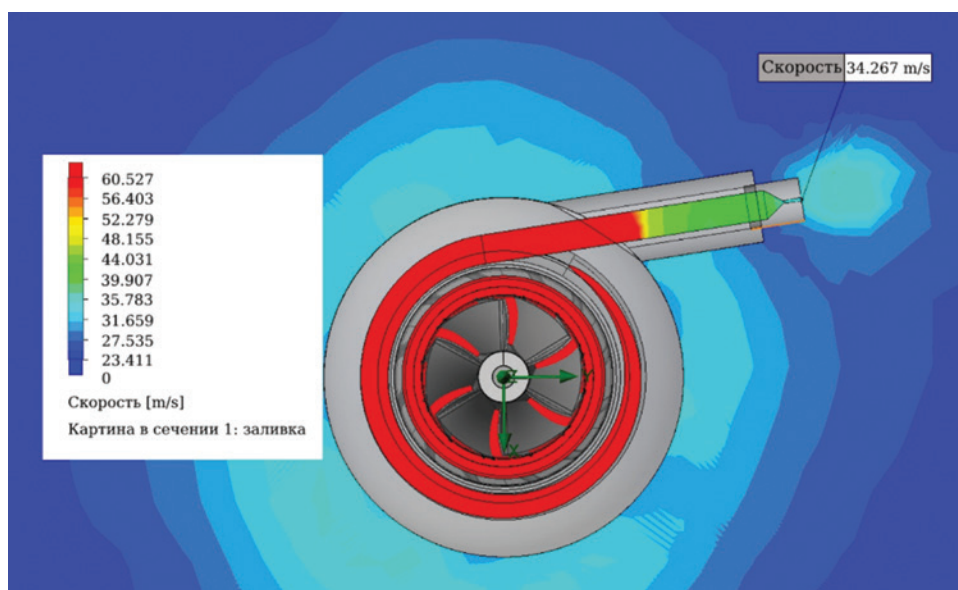


Рис. 3. Результат газодинамического расчета турбины с соплом Лавалья  
 Fig. 3. Result of gas-dynamic calculation of turbine with Laval nozzle

выходе из сопла Лавалья были получены при исследовании результатов газодинамического расчета, как показано на рис. 3.

Из таблицы 1 наблюдается прямая зависимость скорости вращения вала и скорости воз-

душного потока на выходе из сопла Лавалья. С аналогичной прогрессией увеличивается и радиальная скорость воздуха при попадании в улитку. На рис. 4 представлены графики данных зависимостей.

Таблица 1  
 Table 1

*Зависимость скорости воздушного потока на выходе из сопла Лавалья от скорости вращения вала, на котором установлена крыльчатка*  
*Dependence of the airflow velocity at the Laval nozzle outlet on the shaft rotation speed with the installed impeller*

Скорость вращения вала, $n$		Угловая скорость воздуха при попадании в улитку, $\omega$ , рад/с	Радиальная скорость воздуха при попадании в улитку, $v_r$ , м/с	Скорость воздушного потока на выходе из сопла Лавалья, $v$ , м/с
об/мин	об/с			
3 000	50	314.16	27.158	15.346
4 500	75	471.24	31.039	17.539
6 000	100	628.32	35.474	20.046
7 500	125	785.4	40.543	22.910
9 000	150	942.48	46.337	26.148
10 500	175	1 099.56	52.959	29.926
12 000	200	1 256.64	60.527	34.267

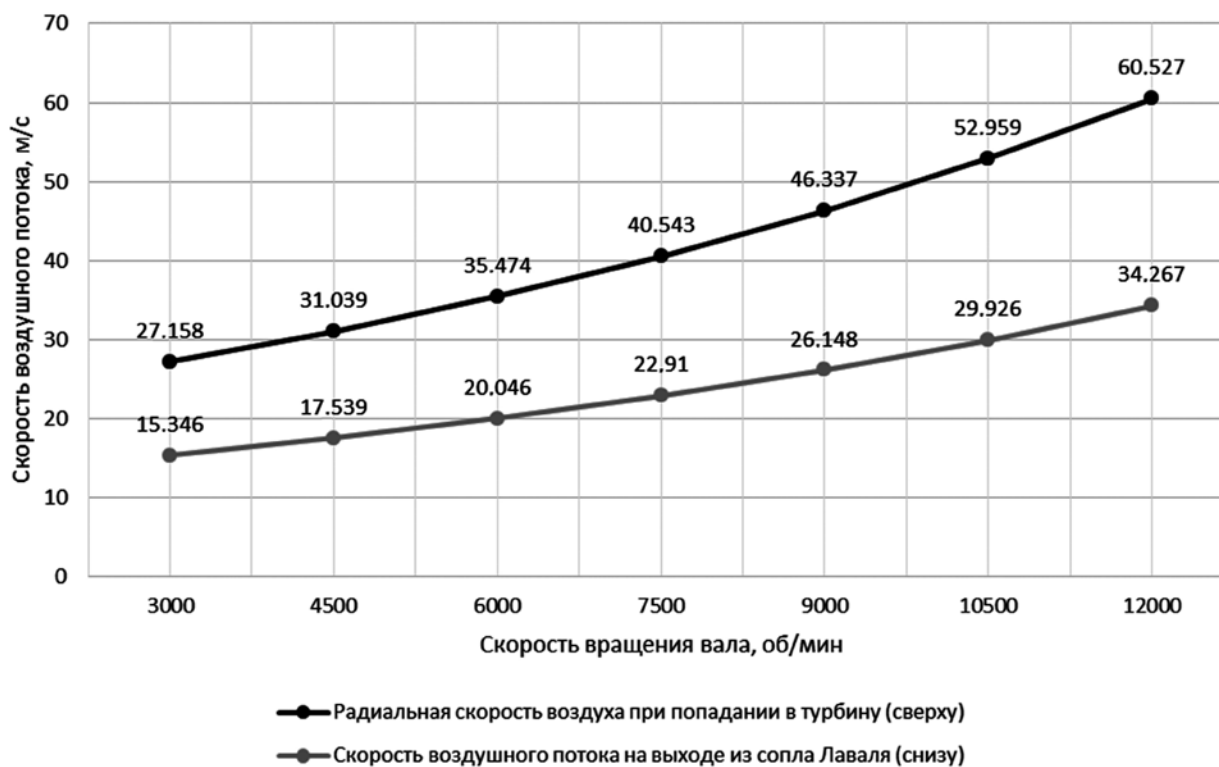


Рис. 4. Графики зависимостей скорости вращения вала от радиальной скорости воздуха при попадании в турбину и скорости воздушного потока на выходе из сопла Лавалья  
 Fig. 4. Diagrams of shaft speed dependence on radial air velocity when entering the turbine and air velocity at the Laval nozzle outlet

На графике прослеживается экспоненциальная зависимость обоих параметров от скорости вращения вала.

В результате продувки данной турбины максимальная скорость воздушного потока на выходе из сопла Лавалья при скорости вращения вала, на котором установлена крыльчатка, равной 12 000 об/мин, составила 34.267 м/с. Данная скорость значительно ниже необходимой, вследствие чего можно сделать вывод, что турбина не подходит в качестве источника воздушного потока для нанесения металлического покрытия методом холодного напыления, поскольку в результате работы турбины не нагнетается необходимое для этого процесса давление. Нагнетание необходимо для создания разности давлений внутри сопла Лавалья, за счет которой происходит увеличение скорости воздушного потока до сверхзвуковых скоростей. Также стоит отметить, что для металлического напыления методом холодного

напыления разность давлений внутри канала сопла Лавалья должна быть величиной в 6 атмосфер.

### Выводы

В ходе исследования было установлено, что при работе турбины скорость воздушного потока на выходе составляет 34.267 м/с, что значительно ниже необходимой для металлического напыления. Это означает, что использование турбины (компрессора) в качестве источника подачи воздуха для обозначенных целей нецелесообразно ввиду невозможности достижения необходимой скорости воздушного потока на выходе из сопла Лавалья. Это обуславливается тем, что турбина во время процесса засасывания воздушных масс и их ускорения по каналу улитки не обеспечивает необходимой разницы давлений, а также скорости воздушного потока, поступающего в канал сопла Лавалья, для создания сверхзвуковой скорости воздушного потока на выходе из него.

### Библиографический список

1. Моравский, А. В. Огонь в упряжке, или Как изобретают тепловые двигатели. Серия: Жизнь замечательных идей / А. В. Моравский, М. А. Файн. – Москва : Знание, 1990. – 192 с. – Текст : непосредственный.
2. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. В 10 томах. Т. 6. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Издание 3-е, стереотипное. – Москва : Издательство «Наука», 1986. – 736 с. – Текст : непосредственный.
3. Гумилевский, Л. И. Густав Лаваль. Серия: Жизнь замечательных людей / Л. И. Гумилевский. – Москва : Журнально-газетное объединение, 1936. – 254 с. – Текст : непосредственный.
4. Алхимов, А. П. Метод «холодного» газодинамического напыления / А. П. Алхимов, В. Ф. Косарев, А. Н. Папырин. – Текст : непосредственный // Доклады АН СССР. – 1990. – Т. 315, № 5. – С. 1062–1065.
5. Данилин, Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок / Б. С. Данилин. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 328 с. – Текст : непосредственный.
6. Харламов, Ю. А. Газотермическое напыление покрытий и экологичность производства, эксплуатации и ремонта машин / Ю. А. Харламов. – Текст : непосредственный // Тяжелое машиностроение. – 2000. – № 2. – С. 10–13.
7. Давлетгареев, М. Ф. Применение SolidWorks Flow Simulation для расчета аэротермодинамики охлаждения электронного блока / М. Ф. Давлетгареев, А. З. Копылов. – Текст : непосредственный // Системы автоматизированного проектирования на транспорте : Тезисы докладов V Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 17–18 апреля 2014 года / Федеральное агентство железнодорожного транспорта, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2014. – С. 47–49.
8. Писарев, Д. Е. Математическое моделирование геометрических параметров сопла Лавалья / Д. Е. Писарев. – Текст : непосредственный // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XX международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 07–08 апреля 2022 года. – Екатеринбург : Уральский государственный горный университет, 2022. – С. 212–216.
9. Писарев, Д. Е. Использование специальных отверстий в сопле Лавалья для изменения скорости воздушного потока / Д. Е. Писарев, С. И. Митрохин. – Текст : непосредственный // Материалы Международной научно-практической конференции им. Д. И. Менделеева, Тюмень, 24–26 ноября 2022 года. Том 2. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2023. – С. 255–258.
10. Новикова, А. А. Изучение геометрических параметров сопла Лавалья, влияющих на скорость воздушного потока / А. А. Новикова, Д. Е. Писарев. – Текст : непосредственный // Наука и образование: актуальные исследования и разработки : Материалы V Всероссийской научно-практической конференции. В 2 частях. Часть 2. Чита, 15–16 сентября 2022 года. – Чита : Забайкальский государственный университет, 2022. – С. 80–84.

### References

1. Moravskiy, A. V., & Fayn, M. A. (1990). Ogon' v upryazhke, ili Kak izobretayut teplovye dvigateli. Zhizn' zamechatel'nykh idey. Moscow, Znanie Publ., 192 p. (In Russian).
2. Landau, L. D., & Lifshits, E. M. (1986). Teoreticheskaya fizika. Gidrodinamika. 3<sup>rd</sup> edition. Moscow, Nauka Publ., 6, 736 p. (In Russian).



3. Gumilevskiy, L. I. (1936). Gustav Laval'. Zhizn' zamechatel'nykh lyudey. Moscow, Zhurnal'no-gazetnoe ob"edinenie Publ., 254 p. (In Russian).
4. Alkhimov, A. P., Kosarev, V. F., & Papyrin, A. N. (1990). Metod "kholodnogo" gazodinamicheskogo napyleniya. Proceedings of the USSR Academy of Sciences, 315(5), pp. 1062-1065. (In Russian).
5. Danilin, B. S. (1989). Primenenie nizkotemperaturnoy plazmy dlya naneseniya tonkikh plenok. Moscow, Energoatomizdat Publ., 328 p. (In Russian).
6. Kharlamov, Yu. A. (2000). Gazotermicheskoe napylenie pokrytiy i ekologichnost' proizvodstva, ekspluatatsii i remonta mashin. Tyazheloe mashinostroenie, (2), pp. 10-13. (In Russian).
7. Davletgareev, M. F., & Kopylov, A. Z. (2014). Primenenie SolidWorks Flow Simulation dlya rascheta aerotermodinamiki okhlazhdeniya elektronnoy bloka. Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya na transporte: Tezisy dokladov V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, April, 17-18. Saint-Petersburg, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University Publ., pp. 47-49. (In Russian).
8. Pisarev, D. E. (2022). Matematicheskoe modelirovanie geometricheskikh parametrov sopla Lavalya. Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti: sbornik trudov XX mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Chteniya pamyati V. R. Kubacheka", April, 07-08. Ekaterinburg, Ural State Mining University Publ., pp. 212-216. (In Russian).
9. Pisarev, D. E., & Mitrokhin, S. I. (2023). Ispol'zovanie spetsial'nykh otverstiy v sople Lavalya dlya izmeneniya skorosti vozdušnogo potoka. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii im. D. I. Mendeleeva, November, 24-26. Tyumen, Industrial University of Tyumen Publ., (2), pp. 255-258. (In Russian).
10. Novikova, A. A., & Pisarev, D. E. (2022). Izuchenie geometricheskikh parametrov sopla Lavalya, vliyayushchikh na skorost' vozdušnogo potoka. Nauka i obrazovanie: aktual'nye issledovaniya i razrabotki: Materialy V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, September, 15-16. Chita, Transbaikal State University Publ., (2), pp. 80-84. (In Russian).

#### **Сведения об авторах**

Писарев Дмитрий Евгеньевич, лаборант кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, e-mail: pisarevde@tyuiu.ru

Митрохин Сергей Иванович, обучающийся кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, e-mail: mitrokhinserega@mail.ru

#### **Information about the authors**

Dmitry E. Pisarev, Laboratory Assistant at the Department of Mechanical Engineering Technology, Industrial University of Tyumen, e-mail: pisarevde@tyuiu.ru

Sergey I. Mitrokhin, Student at the Department of Mechanical Engineering Technology, Industrial University of Tyumen, e-mail: mitrokhinserega@mail.ru

*Получена 5 апреля 2023 г., одобрена 16 мая 2023 г., принята к публикации 28 сентября 2023 г.  
Received 5 April 2023, Approved 16 May 2023, Accepted for publication 28 September 2023*

# О МЕХАНИЗМАХ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

И. Г. Жихарева<sup>1</sup>, В. В. Шмидт<sup>1,2</sup>, Д. В. Денисенко<sup>1,3</sup>, В. П. Щипанов<sup>1</sup>,  
А. Д. Федоров<sup>1</sup>, А. И. Неустроев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

<sup>2</sup> Тюменское высшее военно-инженерное командное училище имени маршала инженерных войск А. И. Прошлякова, Тюмень, Россия

<sup>3</sup> ПАО «Тюменский проектный и научно-исследовательский институт нефтяной и газовой промышленности имени В. И. Муравленко», Тюмень, Россия

## MECHANISMS OF FORMATION OF NANOSTRUCTURED ELECTROLYTIC COATINGS Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr WITH FUNCTIONAL PROPERTIES

Irina G. Zhikhareva<sup>1</sup>, Vadim V. Schmidt<sup>1,2</sup>, Denis V. Denisenko<sup>1,3</sup>, Vladimir P. Shchipanov<sup>1</sup>, Alexander D. Fedorov<sup>1</sup>, Anton I. Neustroev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

<sup>2</sup> Tyumen Higher Military Engineer Command School named after A. I. Proshlyakov, Tyumen, Russia

<sup>3</sup> PJSC "Tyumen Design and Research Institute of Oil and Gas Industry named after V. I. Muravlenko", Tyumen, Russia

**Аннотация.** Развитие современной индустрии невозможно без разработки новых материалов и технологий. В машиностроении одними из самых востребованных являются наноструктурные, в частности, электролитические покрытия. Целью данной работы является изучить различные механизмы получения гальванических сплавов Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr и их взаимосвязь с заданными универсальными физико-механическими свойствами. Сплав Fe-Ni характеризуется высокой микротвердостью и коррозионной стойкостью в морской воде, низкой хладноломкостью; Co-Mn – заданным фазовым составом ( $\alpha$ -Co  $\gg$   $\alpha$ -Mn, аморфно-метастабильная фаза  $\text{Co}(\text{OH})_2$ ); Ni-Cr – высокой микротвердостью покрытия, заданным фазовым составом. Основные методы получения:

**Abstract.** The evolution of modern industry is impossible without the development of new materials and technologies. Nanostructured coatings, in particular electrolytic coatings, are among the most demanded in mechanical engineering. The purpose of this work was to study the different mechanisms of obtaining Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr galvanic alloys and their relationship with the specified universal physical and mechanical properties. Fe-Ni alloy is characterized by high microhardness and corrosion resistance in sea water, low cold brittleness; Co-Mn – by a specified phase composition ( $\alpha$ -Co  $\gg$   $\alpha$ -Mn, amorphous and metastable phase  $\text{Co}(\text{OH})_2$ ); Ni-Cr – by high coating microhardness, specified phase composition. The main methods of production: high-frequency

высокочастотный переменный ток – для сплавов Fe-Ni и Co-Mn; введение специальной добавки (карбамида или H-кислоты) для сплава Ni-Cr. Основные механизмы получения сплавов: Fe-Ni за счет фазового перехода  $\alpha\text{-Fe} \rightarrow \epsilon\text{-Fe}$ ; Co-Mn с помощью высокочастотного переменного тока и добавки карбамида, обеспечивающей заданный фазовый состав; Ni-Cr с помощью стационарного метода добавки H-кислоты (высокохромистого сплава 68 масс. % Cr) и карбамида (низкохромистого сплава 25 масс. % Cr). Рекомендованные области применения для гальванопокрытий: Fe-Ni – для защиты нефтегазодобывающего оборудования, работающего в условиях Арктики; Co-Mn – в модуляционных системах и в качестве нанокатализатора в реакции синтеза Фишера – Тропша; Ni-Cr – для коррозионностойких защитных покрытий в нефтехимии и для резистивных элементов.

**Ключевые слова:** новые покрытия, новые фазы материалов, гальванические покрытия, фазовые переходы, наноструктура, механизмы фазового перехода, сплавы

**Для цитирования:** О механизмах образования наноструктурных электролитических покрытий Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr с функциональными свойствами / И. Г. Жихарева, В. В. Шмидт, Д. В. Денисенко [и др.]. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-96-103. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 3 (105). – С. 96–103.

**For citation:** Zhikhareva, I. G., Schmidt, V. V., Denisenko, D. V., Shchipanov, V. P., Fedorov, A. D., & Neustroev, A. I. (2023). Mechanisms of formation of nanostructured electrolytic coatings Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr with functional properties. *Architecture, Construction, Transport*, (3(105)), pp. 96-103. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-96-103.

## Введение

Современные тенденции развития технологических процессов требуют использования новых материалов. Одними из самых перспективных являются наноматериалы, обладающие ценными группами свойств, определяющими их долговечность в процессе эксплуатации. Последнее во многом зависит от способа получения частиц, размеры которых не превышают 100 нм. Актуальность исследования наноструктурных материалов связана с установлением прямой зависимости размеров нанокластеров с важ-

alternating current for Fe-Ni and Co-Mn alloys; introduction of a special additive (carbamide or H-acid) for Ni-Cr alloy. The main mechanisms are: Fe-Ni due to phase transition  $\alpha\text{-Fe} \rightarrow \epsilon\text{-Fe}$ ; Co-Mn by means of high-frequency alternating current and carbamide addition, providing a specified phase composition; Ni-Cr by means of stationary method of addition of H-acid (high-chromium alloy of 68 mass percent of Cr) and carbamide (low-chromium alloy of 25 mass percent of Cr). Recommended uses for electroplating: Fe-Ni – for protection of oil and gas production equipment in the Arctic; Co-Mn – in modulation systems and as a nanocatalyst in the Fischer-Tropsch synthesis reaction; Ni-Cr – for corrosion-resistant protective coatings in petrochemistry and for resistive elements.

**Key words:** new coatings, new phases of materials, electroplating coatings, phase transitions, nanostructure, phase transition mechanisms, alloys

нейшими функциональными свойствами. Важно уметь классифицировать основные механизмы образования наноструктуры и прогнозировать свойства, на которые они окажут максимальное влияние.

Одной из важнейших технологий, обеспечивающих научно-технический прогресс в начале XXI века, является нанотехнология. Исследованию кластеров монокристаллов посвящено большое число работ [1–3]. В гальванотехнике перспективными наноструктурами являются некристаллические [4], металлические матрицы,

содержащие дисперсную фазу [5], наномасштабные частицы, размеры которых менее 100 нм [6], полученные с участием сильных ингибиторов. В статье [7] авторы описывают, как ведут себя наноструктуры при электрокристаллизации никеля в присутствии сильного ингибитора.

В наноматериалах часто наблюдается зависимость физических, механических и химических свойств от размера составляющих их частиц. Данные характеристики можно обнаружить с помощью магнитных свойств и магнитных фазовых переходов [8].

### **Объект и методы исследования**

Цель работы: изучить влияние методов получения покрытий сплавами Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr на механизм образования наноструктуры и связь механизма с конкретными функциональными свойствами исследуемых материалов.

Основные требования, которым должны соответствовать сплавы:

1) Fe-Ni – высокая микротвердость и сопротивляемость коррозии в морской воде и солевой среде, низкий порог хладноломкости, наличие наноструктуры и зависимости физических, механических и химических свойств наноматериала от размера составляющих его частиц;

2) Co-Mn – высокое содержание фазы  $\alpha$ -Co, наноструктура, наличие регулируемой концентрации аморфно-метастабильной фазы (АМФ)  $\text{Co}(\text{OH})_2$ ;

3) Ni-Cr – высокая твердость отдельных участков микроструктуры материала, наноструктурность, заданный перечень фаз, который есть в данном сплаве, и химический состав.

Задачи решались за счет: 1) нового способа получения сплавов Fe-Ni, Co-Mn с помощью высокочастотного переменного тока (ВПТ); 2) использования специальных добавок (карбамида,

Н-кислоты) для получения сплава Ni-Cr; 3) использования регулируемого количества аморфизированной фазы для получения сплава Co-Mn.

Покрытия получены из простых водных электролитов при стационарных условиях ( $P = 0.1$  МПа,  $T = 298$  К) [9]. Перечень фаз, который есть в данных сплавах, определяли при помощи рентгеновского дифрактометра D2 Phaser, применяя излучения Co-K $\alpha$ , Fe фильтры на отражение, фокусировки по Брэггу – Brentано. Исследование параметров элементарных ячеек фаз проводилось в области углов  $2\theta = 20^\circ - 120^\circ$  с точностью 0.002 нм. Результаты установления количества фаз в исследуемом образце, их качественный и количественный анализ сопоставлялись с картотекой COD. Исследование поверхностной структуры покрытий и наноструктуры проводилось с помощью зондового атомно-силового микроскопа (АСМ) NTegra Aura (ООО «НТ-МДТ», Россия) полуконтактным методом со сканированием образца. Латеральное разрешение сканирования микроскопа составляет не менее 1 нм, разрешение по высоте – не менее 0.5 нм. Исследование микроструктуры, химического состава подповерхностных слоев проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6510LV (Япония) с рентгеноспектральными анализаторами, разрешение до 1.2 нм. Погрешность измерения в определении содержания элементов  $\pm 0.2$  масс. %. Определение микротвердости проводили методом дюрометрического анализа с помощью микротвердомера ПМТ-3М при нагрузке на индентор 20–50 г. Погрешность измерений 5–7 %, согласно ГОСТ 9450-76<sup>1</sup>.

### **Экспериментальная часть**

Осаждение проводилось из простых сульфатных и хлоридно-сульфатных электролитов. Исследовались химический и фазовый состав, микро-

<sup>1</sup> ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников = Measurements microhardness by diamond instruments indentation : государственный стандарт Союза ССР : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 09.01.76 г. № 68 : дата введения 01.01.1977 / Разработан и внесен Академией наук СССР // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012869> (дата обращения: 14.06.2023).

Таблица 1  
Table 1

Химический и фазовый состав сплавов Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr  
Chemical and phase composition of Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr alloys

№	Сплав. Метод получения. Условие	Химическое содержание элементов, %	Фазовый состав		Размер нанокластеров, нм	Толщина $\delta$ , мкм
			Фазы	Масс. %		
1	Fe-Ni ВПТ f = 5 кГц	87-13	$\alpha$ -Fe $\epsilon$ -Fe	77 23	10-12	2-1 500
2	Fe-Ni ВПТ f = 9 кГц	84-16	$\alpha$ -Fe $\epsilon$ -Fe	68 32	- 10	2-1 500
3	Co-Mn ВПТ о-АСК	97.5-2.5	$\alpha$ -Co $\beta$ -Co $\alpha$ -Mn Co(OH) <sub>2</sub>	96 - 2.3 1.5	25-30	2-10
4	Co-Mn СМ о-АСК	99.1-0.9	$\alpha$ -Co $\beta$ -Co $\alpha$ -Mn Co(OH) <sub>2</sub>	74 20 1.2 3.8	50-80	2-6
5	Ni-Cr СМ (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO	75-25	$\beta$ -Ni NiO, АМФ	89 3.3 7.6	50-80	20-40
6	Ni-Cr СМ H-кислота	38-62	$\alpha$ -Cr $\beta$ -Ni CrO <sub>3</sub>	67 28 3.5	80-100	20-50

структура, наноструктура и некоторые физические свойства (таблица 1). Химическое содержание металла-растворителя во всех случаях предельно высокое (до 99.1 масс. %). Это во многом определяет и фазовый состав.

Исключение составляет появление новой  $\epsilon$ -фазы для сплава Fe-Ni. При стационарных условиях она не образуется. Наноструктура получена

для всех исследованных сплавов (рис. 1-3), но размерные эффекты обнаружены главным образом для покрытий сплавом Fe-Ni (таблица 1, № 1, 2) и сплавом Co-Mn (таблица 1, № 3).

Толщина покрытия  $\delta$  определяется в основном методом получения покрытия. Самый широкий диапазон  $\delta$  отмечен для покрытий, полученных методом ВПТ.

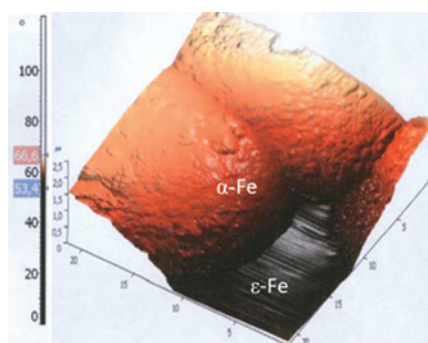


Рис. 1. Наноструктурное строение сплава Fe-Ni (фаза  $\epsilon$ -Fe; метод ВПТ)

Fig. 1. Nanostructural structure of Fe-Ni alloy ( $\epsilon$ -Fe phase; high-frequency alternating current method)

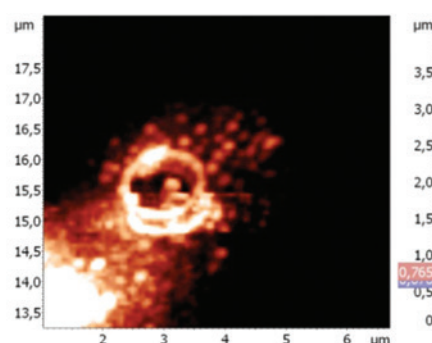


Рис. 2. Наноструктура сплава Co-Mn.

Светлые кольца Co(OH)<sub>2</sub>  
Fig. 2. Co-Mn alloy nanostructure.  
Light rings of Co(OH)<sub>2</sub>

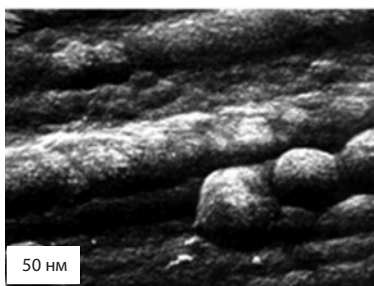


Рис. 3. Полислойные наноструктурные пленки сплава Ni-Cr. Поперечный срез для структуры [110]  
 Fig. 3. Poly-layer nanostructured Ni-Cr alloy membrane. Cross section for the structure [110]

### Результаты

Из анализа экспериментальных данных следует, что наноструктура сплавов Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr формировалась по разным механизмам.

1. Особенностью механизма образования электролитического сплава Fe-Ni является образование новой ГПУ-фазы  $\epsilon$ -Fe вследствие фазового перехода из  $\alpha$ -Fe. Ранее эта экзотическая фаза была обнаружена во внутреннем ядре Земли, железных метеоритах и была получена в лабораторных условиях при  $p = 11-11.5$  ГПа,  $T = 750$  К; но при снятии давления происходит обратный фазовый переход  $\epsilon$ -Fe  $\rightarrow$   $\alpha$ -Fe [9]. То есть ни один лабораторный метод получения не позволяет со-

хранить фазу  $\epsilon$ -Fe при нормальных условиях, за исключением вышеописанного метода ВПТ. Расчеты, проведенные по теории ориентированной электрокристаллизации (ТОЭ) для работы двумерного зародышеобразования, показали, что фаза  $\epsilon$ -Fe в самопроизвольных процессах существовать не может, так как  $A\epsilon$ -Fe  $\gg$   $A\alpha$ -Fe, но возможно существование текстурного соответствия:

$$\frac{\alpha\text{-Fe(ОЦК)}}{(110)}, \frac{\epsilon\text{-Fe(ГПУ)}}{(0001)} [10].$$

В случае метода ВПТ фазовый переход происходит по ориентационному механизму. Анодная составляющая способствует удалению чужеродных частиц и части крайних атомов Fe. При катодной составляющей происходит переориентировка валентных связей и углов:  $\alpha$ -Fe  $\rightarrow$   $\epsilon$ -Fe. Размерные эффекты обеспечиваются управлением длительности импульса в заданных пределах. В результате сплав Fe-Ni содержит 2 фазы:  $\alpha$ -Fe (ОЦК) и  $\epsilon$ -Fe (ГПУ). Атомно-силовая микроскопия показала, что поликристаллы (рис. 1) состоят из нанопластинок размером 10 нм, находящихся на расстоянии 8 нм. Это позволяет прогнозировать для сплава Fe-Ni повышение функциональных свойств (таблица 2).

Таблица 2  
 Table 2

Механизм формирования наноструктуры и свойства покрытий  
 Mechanism of nanostructure formation and properties of coatings

Сплав	Механизм	Свойства	Области применения
Fe <sub>84</sub> -Ni <sub>16</sub>	ВПТ, фазовый переход $\alpha$ -Fe $\rightarrow$ $\epsilon$ -Fe	HV = 1 780 МПа, T <sub>хр</sub> = -150 °С, K <sub>n</sub> = 0.6 мкм/год, d = 8-10 нм	Покрытия для защиты нефтегазодобывающего оборудования, работающего в условиях Арктики. Коррозионностойкие защитные покрытия в нефтехимии. Нанокатализатор для синтеза Фишера – Тропша
Co <sub>97</sub> -Mn <sub>3</sub>	ВПТ, добавка о-АСК, $\alpha$ -Co $\gg$ $\alpha$ -Mn Co(OH) <sub>2</sub>	H <sub>c</sub> = 1050 А/м, d = 15-20 нм, HV = 555 МПа,	Модуляционные системы. Нанокатализатор для синтеза Фишера – Тропша
Ni <sub>75</sub> -Cr <sub>25</sub>	карбамид, $\alpha$ -Cr, NiO, АМФ	HV = 985 МПа, d = 50-80 нм	Коррозионностойкие защитные покрытия в нефтехимии
Ni <sub>32</sub> -Cr <sub>68</sub>	Н-кислота $\alpha$ -Cr, $\beta$ -Ni, CrO <sub>3</sub>	HV = 690 МПа, d = 80-100 нм	Тензорезистивные элементы

2. Лучшее покрытие сплавом Co-Mn получено методом ВПТ. Новых фаз не образуется, но появляется возможность управления процентным содержанием фазы  $\alpha$ -Co при помощи ПАВ – о-АСК. Роль последней – поддержание pH прикатодного слоя на требуемом уровне для связывания  $H_2$ . Механизмы формирования наноструктуры в этом случае сводятся к обеспечению размерных эффектов – пленки аморфной фазы  $Co(OH)_2$  вокруг кластеров сплава Co-Mn (рис. 2). При наличии тонких пленок сплав Co-Mn должен обладать отличными магнитными и каталитическими свойствами.

3. Покрытия Ni-Cr с высокими механическими свойствами можно спрогнозировать с помощью ТОЭ [10]. Величина микротвердости четко коррелирует с энергетической характеристикой – эффективной поверхностной энергией  $\bar{\sigma}_{hkl}$ , чем она больше, тем выше микротвердость [11]. Рассчитав оптимальные значения поверхностной энергии для сплава Ni-Cr, мы получили покрытие с высокой микротвердостью. То есть микротвердостью можно управлять, получая покрытие с высокими значениями эффективной поверхностной энергии при активирующей адсорбции и наличием наноструктурных пленок.

### Выводы

1. Предложены и обоснованы механизмы формирования наноструктуры гальванических покрытий на основе металлов подгруппы железа:

- в результате фазового перехода и образования новой ГПУ-фазы (Fe-Ni, ВПТ);
- за счет регулируемого содержания аморфной фазы  $Co(OH)_2$  и прогнозируемого фазового и химического состава (Co-Mn, ТОЭ);
- за счет прогнозирования и расчета заданной  $\bar{\sigma}_{hkl}$  по ТОЭ и полученных аморфных пленок  $Cr(OH)_3 \cdot (H_2O) \cdot 2H_2O$  (Ni-Cr).

Химические составы сплавов  $Ni_{75}-Cr_{25}$  и  $Ni_{32}-Cr_{68}$  получены из электролита одинакового состава, но с разными добавками: карбамид и Н-кислота соответственно.

2. Показано, что наиболее эффективным способом обеспечения наличия наноструктуры является метод ВПТ. Размерные эффекты наблюдались только при этом методе. Разнообразие физико-механических свойств позволяет рекомендовать применение покрытий в различных областях промышленности.

В ходе проведенного исследования методом высокочастотного переменного тока получены наноструктурные покрытия сплавами Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr.

Данные наноструктурные электролитические покрытия удовлетворяют требованиям к криогенным антикоррозионным покрытиям и способны по технологичности и экономичности заменить применяемый в настоящее время в машиностроении большой кластер разнообразных по своим физико-химическим свойствам материалов.

### Библиографический список

1. Sergeev, G. B. Nanochemistry of metals / G. B. Sergeev. – DOI 10.1070/RC2001v070n10ABEH000671. – Текст : непосредственный // Russian Chemical Reviews. – 2001. – Vol. 70, No 10. – P. 809–825.
2. Gusev, A. I. Nanocrystalline materials / A. I. Gusev, A. A. Rempel. – Chippenham : Cambridge International Science Publishing, 2004. – 351 p. – Текст : непосредственный.
3. Crystalline and amorphous electroless Co-W-P coatings / S. Armyanov, E. Valova, A. Franquet [et al.]. – DOI 10.1149/1.1990124 // Journal of the Electrochemical Society. – 2005. – Vol. 152, № 9. – P. 612–619.
4. Electroless deposition of Ni-Sn-P and Ni-Sn-Cu-P coatings / J. Georgieva, S. Kawashima, S. Armyanov [et al.]. – DOI 10.1149/1.2050467. – Текст : непосредственный // Journal of The Electrochemical Society. – 2005. – Vol. 152, No 11. – P. 783.
5. Воздвиженский, В. М. Классификация легирующих элементов и расчет количества  $\gamma'$ -фазы в жаропрочных никелевых сплавах / В. М. Воздвиженский, А. А. Шатульский, М. А. Шаповалова. – Текст : непосредственный // Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – № 8. – С. 44–49.

6. Korotaev, A. D. Structural-phase state, elastic stress, and functional properties of nanocomposite coatings based on amorphous carbon / A. D. Korotaev, I. Y. Litovchenko, S. V. Ovchinnikov. – DOI 10.1134/S1029959919060055. – Текст : непосредственный // *Physical Mesomechanics*. – 2019. – Vol. 22, No 6. – P. 488–495.
7. Inhibition and nickel electrocrystallization / J. Amblard, I. Epelboin, M. Froment, G. Maurin. – DOI 10.1007/BF00616093. – Текст : непосредственный // *Journal of Applied Electrochemistry*. – 1979. – No 9. – С. 233–242.
8. Breakthroughs in optimization of mechanical properties of nanostructured metals and alloys / C. C. Koch, K. M. Youssef, R. O. Scattergood, K. L. Murty. – DOI 10.1002/adem.200500094. – Текст : непосредственный // *Advanced Engineering Materials*. – 2005. – Vol. 7, No 9. – P. 787–794.
9. Zhikhareva, I. G. The role of nanostructure forming mechanism in the production of universal functional coatings with Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr alloys / I. G. Zhikhareva, V. V. Schmidt, D. V. Denisenko. – DOI 10.1088/1757-899X/971/3/032002. – Текст : непосредственный // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, September, 07–11. – Sevastopol, 2020. – P. 032002.
10. Schmidt, V. V. Hardening of coatings with Ni-Co-Cr alloy dye to nanostructure / V. V. Schmidt, D. V. Denisenko, I. G. Zhikhareva. – DOI 10.1088/1742-6596/1431/1/012018 // *Journal of Physics: Conference Series: VIII International Conference "Deformation and Fracture of Materials and Nanomaterials"*, November, 19–22. – Vol. 1431. – Moscow : Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012018.
11. Zhikhareva, I. G. Development of corrosion-protective coatings with a Fe-Ni nanostructured alloy, designed to work in the Arctic / I. G. Zhikhareva, D. V. Denisenko, V. V. Schmidt. – DOI 10.1063/1.5135163. – Текст : непосредственный // *AIP Conference Proceedings: Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures*, December, 09–13. – Vol. 2176. – Ekaterinburg : American Institute of Physics, 2019. – P. 040014.

### References

1. Sergeev, G. B. (2001). Nanochemistry of metals. *Russian Chemical Reviews*, 70 (10), pp. 809-825. (In English). DOI 10.1070/RC2001v070n10ABEH000671.
2. Gusev, A. I., & Rempel, A. A. (2004). *Nanocrystalline materials*. Chippenham, Publ. Cambridge International Science Publishing, 351 p. (In English).
3. Armyanov, S., Valova, E., Franquet, A., Dille, J., Delplancke, J.-L., Hubin, A., ... Vassilev, Ts. (2005). Crystalline and amorphous electroless Co-W-P coatings. *Journal of the Electrochemical Society*, 152(9), pp. 612-619. (In English). DOI 10.1149/1.1990124.
4. Georgieva, J., Kawashima, S., Armyanov, S., Valova, E., Hubin, A., Koyama, Y., ... Tsacheva, Ts. (2005). Electroless deposition of Ni-Sn-P and Ni-Sn-Cu-P coatings. *Journal of The Electrochemical Society*, 152(11), pp. 783. (In English). DOI 10.1149/1.2050467.
5. Vozdvizhensky, V. M., Shatulsky, A. A., & Shapovalova, M. A. (2007). Classification of alloying elements and  $\gamma'$ -phase quantity calculation in heat-resistant nickel alloys. *Blanking production in mechanical engineering*, (8), pp. 44-49. (In Russian).
6. Korotaev, A. D., Litovchenko, I. Y., & Ovchinnikov, S. V. (2019). Structural-phase state, elastic stress, and functional properties of nanocomposite coatings based on amorphous carbon. *Physical Mesomechanics*, 22(6), pp. 488-495. (In English). DOI 10.1134/S1029959919060055.
7. Amblard, J., Epelboin, I., Froment, M., & Maurin, G. (1979). Inhibition and nickel electrocrystallization. *Journal of Applied Electrochemistry*, (9), pp. 233-242. (In English). DOI 10.1007/BF00616093.
8. Koch, C. C., Youssef, K. M., Scattergood, R. O., & Murty, K. L. (2005). Breakthroughs in optimization of mechanical properties of nanostructured metals and alloys. *Advanced Engineering Materials*, 7(9), pp. 787-794. (In English). DOI 10.1002/adem.200500094.



9. Zhikhareva, I. G., Schmidt, V. V., & Denisenko, D. V. (2020). The role of nanostructure forming mechanism in the production of universal functional coatings with Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr alloys. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, September, 07–11. Sevastopol, Publ. IOP Publishing Ltd, pp. 032002. (In English). DOI 10.1088/1757-899X/971/3/032002.
10. Schmidt, V. V., Denisenko, D. V., & Zhikhareva, I. G. (2020). Hardening of coatings with Ni-Co-Cr alloy dye to nanostructure. Journal of Physics: Conference Series : VIII International Conference "Deformation and Fracture of Materials and Nanomaterials"; November, 19-22. Moscow, Publ. Institute of Physics Publishing, 1431, pp. 012018. (In English). DOI 10.1088/1742-6596/1431/1/012018.
11. Zhikhareva, I. G., Denisenko, D. V., & Schmidt V. V. (2019). Development of corrosion-protective coatings with a Fe-Ni nanostructured alloy, designed to work in the Arctic. AIP Conference Proceedings : Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, December, 09–13, 2176. Ekaterinburg, Publ. American Institute of Physics, pp. 040014. (In English). DOI 10.1063/1.5135163.

### **Сведения об авторах**

Жихарева Ирина Георгиевна, д-р хим. наук, профессор кафедры общей и физической химии, Тюменский индустриальный университет, e-mail: zhiharevaig@tyuiu.ru

Шмидт Вадим Владимирович, канд. хим. наук, доцент кафедры общей и физической химии, Тюменский индустриальный университет, преподаватель кафедры войскового строительства, Тюменское высшее военно-инженерное командное училище имени маршала инженерных войск А. И. Прошлякова, e-mail: shmidt\_vadim@mail.ru

Денисенко Денис Владимирович, ассистент-стажер кафедры общей и физической химии, Тюменский индустриальный университет, ведущий инженер, ПАО «Тюменский проектный и научно-исследовательский институт нефтяной и газовой промышленности имени В. И. Муравленко», e-mail: ardiasardias@gmail.com

Щипанов Владимир Павлович, д-р хим. наук, профессор кафедры общей и физической химии, Тюменский индустриальный университет, e-mail: schipanovvp@tyuiu.ru

Федоров Александр Дмитриевич, обучающийся кафедры переработки нефти и газа, Тюменский индустриальный университет

Неустроев Антон Иванович, обучающийся кафедры переработки нефти и газа, Тюменский индустриальный университет

### **Information about the authors**

Irina G. Zhikhareva, Doctor in Chemistry, Professor at the Department of General and Physical Chemistry, Industrial University of Tyumen, e-mail: zhiharevaig@tyuiu.ru

Vadim V. Schmidt, Candidate in Chemistry, Associate Professor at the Department of General and Physical Chemistry, Industrial University of Tyumen, Lecturer at the Department of Military Construction, Tyumen Higher Military Engineer Command School named after A. I. Proshlyakov, e-mail: shmidt\_vadim@mail.ru

Denis V. Denisenko, Intern-Assistant at the Department of General and Physical Chemistry, Industrial University of Tyumen, Leading Engineer, PJSC "Tyumen Design and Research Institute of Oil and Gas Industry named after V. I. Muravlenko", e-mail: ardiasardias@gmail.com

Vladimir P. Shchipanov, Doctor in Chemistry, Professor at the Department of General and Physical Chemistry, Industrial University of Tyumen, e-mail: schipanovvp@tyuiu.ru

Alexander D. Fedorov, Student at the Department of Oil and Gas Processing, Industrial University of Tyumen, e-mail: af524523@gmail.com

Anton I. Neustroev, Student at the Department of Oil and Gas Processing, Industrial University of Tyumen, e-mail: anton\_neustroev2020@mail.ru

*Получена 12 мая 2023 г., одобрена 26 мая 2023 г., принята к публикации 28 сентября 2023 г.  
Received 12 May 2023, Approved 26 May 2023, Accepted for publication 28 September 2023*

# ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ

1. К предоставляемой рукописи должны быть приложены следующие документы:

- сопроводительное письмо автора на имя главного редактора журнала, подтверждающее, что статья нигде ранее не была опубликована;
- экспертное заключение организации, откуда исходит рукопись, о возможности открытого опубликования.

В случае принятия положительного решения о публикации рукописи в журнале автор должен предоставить в редакцию подписанный вариант рукописи (или ее скан).

2. Все поступающие в редакцию журнала рукописи статьи проходят проверку на наличие заимствований. Статьи, содержащие менее 75 % оригинального текста, в журнале не публикуются (проверка уникальности текста осуществляется без учета метаданных и библиографического списка).

3. Рукописи, соответствующие тематике журнала, проходят процедуру двойного слепого рецензирования с целью их экспертной оценки. Рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции в течение 5 лет.

4. Технические требования к тексту.

**Формат файлов для текста** – Microsoft Word (\*.docx). Название файла должно включать фамилию и инициалы автора статьи (например: Иванов\_ИИ.docx). Статьи, содержащие формулы, помимо word-файла необходимо продублировать pdf-файлом во избежание искажения формул, которые следует набирать в MathType 4.0 Equation.

**Объем статьи** – не менее 5 и не более 15 страниц (не включая библиографический список). Размер шрифта 12 пт (Times New Roman), межстрочный интервал одинарный, абзац 0,5 см. Поля страниц: верхнее 20 мм, нижнее 20 мм, левое 20 мм, правое 20 мм.

**Все графические объекты** должны быть предоставлены отдельными файлами: один рисунок – один файл графического формата. Растровые рисунки (фото) предоставляются в формате JPG с разрешением не менее 300 dpi. Каждый рисунок должен быть помещен в текст и сопровождаться нумерованной подрисуночной подписью. Ссылки на рисунки в тексте обязательны.

**Таблицы** следует помещать в текст статьи, они должны иметь нумерацию, заголовок и четко обозначенные графы, удобные и понятные для чтения. Ссылки на таблицы в тексте обязательны.

**Объем иллюстративных материалов** (таблиц и графических материалов) не должен превышать 1/3 общего объема рукописи.

**Библиографический список** (не менее 15 источников) должен содержать ссылки на актуальные научные работы отечественных и зарубежных специалистов. Объем самоцитирования – не более 30 % от общего числа ссылок.

**Нумерация использованных источников в списке** дается в порядке последовательности ссылок. На все источники должны быть ссылки в тексте статьи в квадратных скобках. В списке не должно быть «неавторизованных» источников (СП, СНиПов, ГОСТов и т. п.) – на них ссылки даются непосредственно в тексте статьи.

**Библиографический список на русском языке** должен быть оформлен согласно ГОСТ Р 7.0.100–2018.

5. Рукопись статьи должна включать:

- индекс УДК;
- название статьи на русском языке;
- инициалы и фамилию автора на русском языке (если авторов несколько, они работают в разных организациях, то после фамилии ставится верхний индекс (1, 2 и т.д.), соответствующий органи-

зации, откуда исходит рукопись, указанной ниже под тем же номером, следом необходимо указать город и страну. Если автор один или все авторы работают в одной организации, то индексы не ставятся);

- аннотация на русском языке (общий объем аннотации – не более 500 знаков);
  - ключевые слова на русском языке (до 10 слов и (или) словосочетаний);
- Пункты 2–5 необходимо продублировать ниже на английском языке*
- основной текст статьи на языке оригинала;
  - библиографический список на русском языке;
  - сведения об авторах (Information about the authors): полные Ф.И.О., должность, ученая степень, звание, место работы, телефон, e-mail – на русском и английском языках.

**6.** Структура основного текста статьи должна включать следующие рубрики, согласно стандарту IMRAD: введение, объект и методы исследования, экспериментальная часть/постановка эксперимента, результаты, обсуждение, выводы, приложения.

- **Введение.** Включает актуальность исследования, обзор литературы по теме исследования, постановку проблемы, формулирование цели и задач исследования.
- **Объект и методы исследования.** Данный раздел включает детальное описание методов и схемы экспериментов/наблюдений, позволяющих воспроизвести их результаты, пользуясь только текстом статьи; материалы, приборы, оборудование и другие условия проведения экспериментов/наблюдений.
- **Экспериментальная часть/постановка эксперимента.** Необязательный раздел. Может включать подробную информацию о стадиях реализации эксперимента, включающую графические материалы для наиболее полного раскрытия методики и условий проведения опытов.
- **Результаты.** Результаты рекомендуется представлять преимущественно в виде таблиц, графиков и иных наглядных формах. Этот раздел включает анализ полученных результатов, их интерпретацию, сравнение с результатами других авторов.
- **Обсуждение.** Содержит интерпретацию полученных результатов исследования; ограничения исследования и обобщения его результатов; предложения по практическому применению; предложения по направлению будущих исследований.
- **Выводы.** Подводятся итоги научного исследования. Заключение содержит выводы, кратко формулирующие основные научные результаты статьи. Выводы должны логически соответствовать поставленным в начале статьи задачам, содержать краткие итоги разделов статьи без повторения формулировок, приведенных в них.
- **Приложения.** Необязательный раздел. Может включать информацию о грантовой поддержке, при которой было реализовано исследование, а также содержать благодарности в адрес других ученых и/или предприятий, оказавших содействие в реализации исследования.

**7.** Рукопись, допущенная к публикации, проходит принятый редакцией процесс допечатной подготовки, включающий редактирование, корректуру, верстку.

**8.** Исправленные статьи авторам не предоставляются. Рукописи, не удовлетворяющие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются и авторам не возвращаются.

**9.** Плата за опубликование рукописей **не взимается.**

Перепечатка материалов или их фрагментов возможна только с письменного разрешения редакции. Ссылка на научно-информационный журнал «Архитектура, строительство, транспорт» **обязательна!**

# MANUSCRIPT PREPARATION GUIDELINES

1. The following documents must be attached to the submitted manuscript:
  - a cover letter from the author addressed to the editor-in-chief of the journal, confirming that the article has not been published anywhere else;
  - expert evaluation of the organization where the manuscript comes from on the possibility of open publication.

If a positive decision is made to publish the manuscript in the journal, the author must submit to the editor a signed version of the manuscript (or its scan).

2. All manuscripts submitted to the journal are checked for plagiarism. Articles containing less than 75% of the original text are not accepted for publication in the journal (verification of the uniqueness of the text is carried out without taking into account metadata and bibliographic list).

3. Manuscripts corresponding to the subject matter of the journal undergo a double-blind peer review procedure for the purpose of their expert evaluation. The reviewers are recognized experts in the subject matter of the reviewed material. The reviews are kept in the editorial office for 5 years.

4. Article format requirements

**The file format** for the text is Microsoft Word (\* .docx). The file name must include the surname and initials of the author of the article (for example Ivanov\_AA.doc) Articles containing formulas, in addition to the word file, must be duplicated with a pdf file in order to avoid distorting the formulas that should be typed in MathType 4.0 Equation.

The article should be no less than 5 and no more than 15 pages (not including the reference list). Use 12 pt Times New Roman, single line spacing, paragraph 0.5 cm. Page margins: top 20 mm, bottom 20 mm, left 20 mm, right 20 mm.

**All graphic objects** must be submitted in separate files: one figure – one graphic format file. Raster images (photos) are submitted in JPG format with a resolution of at least 300 dpi. Each figure should be placed in the text and accompanied by a numbered figure caption. References to figures in the text are required.

**Tables** should be placed in the text of the article, they should have a numbering, heading and clearly marked columns, convenient and easy to read. References to tables in the text are required.

**The volume of illustrative materials** (tables and graphic materials) should not exceed 1/3 of the total volume of the manuscript.

**The list of references** (at least 15 sources) should contain links to current scientific works of national and foreign specialists. Self-citations should not exceed 30 % of the total number of links.

**The numbering of the sources** used in the list is given in the order of the sequence of references. All sources should be referenced in the text of the article in square brackets. The list should not contain "unauthorized" sources (SP, SNIps, GOSTs, etc.) – links to them are given directly in the text of the article.

**The list of references** in Russian must be drawn up in accordance with GOST R 7.0.100–2018 (in English – with APA 6<sup>th</sup> Edition).

5. The manuscript of the article should include:

- UDC index;
- title of the article;
- initials and surname of the author (if there are several authors, and they work in different organizations, then a superscript (1, 2, etc.) is put after the surname, corresponding to the organization which the

manuscript comes from, indicated below under the same number, followed by the city and country. If there is one author or all authors work in one organization, then the superscripts are not used);

- abstract (no more than 500 characters);
- key words (up to 10 words and (or) phrases);
- main text of the article in the original language;
- references;
- information about the authors: full name, position, academic degree, title, place of work, telephone, e-mail.

6. The structure of the main body of the article should include the following sections, according to the IMRAD structure: introduction, object and methods of research, experimental part/experiment, results, discussion, conclusions, applications.

- **Introduction.** It includes the relevance of the research, literature review on the research topic, problem statement, formulation of the goal and objectives of the research.
- **Object and methods** of research. This section includes a detailed description of the methods and schemes of experiments/observations that make it possible to reproduce their results using only the text of the article, as well as materials, devices, equipment, and other conditions for conducting experiments/observations.
- **Experimental part/experiment.** It is an optional section. It may include detailed information about the stages of the experiment, including graphic materials for the most complete disclosure of the methodology and conditions of the experiment.
- **Results.** It is recommended to present the results mainly in the form of tables, graphs, and other visual forms. This section includes the analysis of the results obtained, their interpretation, comparison with the results of other authors.
- **Discussion.** It contains the interpretation of the obtained research results, limitations of research and generalization of its results, suggestions for practical application, suggestions for future research.
- **Conclusions.** Here the results of the research are summed up. Conclusions summarize the main scientific results of the article. Conclusions should logically correspond to the objectives set at the beginning of the article, contain brief summaries of the sections of the article without repeating the formulations given in them.
- **Applications.** It is an optional section. It may include information about grant support under which the research was carried out, and also gratitude to other scientists and/or enterprises who contributed to the implementation of the research.

7. The manuscript, admitted for publication, goes through the prepress process adopted by the editors, including editing, proofreading, and layout.

8. Corrected articles will not be provided to authors. Manuscripts that do not meet the listed requirements will not be accepted for consideration and will not be returned to authors.

9. There is no fee for the publication of manuscripts.

Reprinting of materials or their fragments is possible only with the written permission of the publisher.

A link to the scientific and reference journal "Arhitektura, stroitel'stvo, transport" ["Architecture, Construction, Transport"] **is required!**

# ПОБЕДИТЕЛИ XXII КОНКУРСА «НА ЛУЧШЕЕ ДОСТИЖЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ ЗА 2022 ГОД»

## **В номинации «Организация года» диплом победителя конкурса присужден:**

*Среди организаций-заказчиков:*

- ОАО «Запсибгазпром».

*Среди генподрядных организаций численностью свыше 300 человек:*

- ООО «Запсибгазпром-Газификация»;
- АО «Тюменская домостроительная компания»;
- АО «Мостострой-11».

*Среди генподрядных организаций численностью до 300 человек:*

- ООО «ЭНКО ГРУПП».

*Среди специализированных отделочных организаций:*

- ООО «Верхолаз».

*Среди специализированных электромонтажных организаций до 300 человек:*

- ООО «ДСК-Энерго».

*Среди организаций, осуществляющих поставку строительных материалов и оказывающих услуги:*

- ООО «Оконные системы ТДС».

*Среди организаций промышленности строительных материалов численностью свыше 300 человек:*

- ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия»;
- ООО «Винзилинский завод керамических стеновых материалов».

*Среди организаций промышленности строительных материалов численностью до 300 человек:*

- ООО «Сибжилстрой».

*Среди учреждений образования, готовящих специалистов для строительной отрасли:*

- Институту архитектуры и дизайна ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»;
- Строительному институту ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»;
- ГАПОУ ТО «Тюменский техникум строительной индустрии и городского хозяйства»;
- ГАПОУ ТО «Тюменский колледж производственных и социальных технологий».

## **В номинации «Организация года» диплом лауреата конкурса присужден:**

*Среди организаций-заказчиков:*

- ООО «Сибирские владения».

*Среди учреждений образования, готовящих специалистов для строительной отрасли:*

- ГАПОУ ТО «Агротехнологический колледж», г. Ялуторовск.

## **В номинации «Руководитель года» диплом победителя конкурса присужден:**

*Среди организаций-заказчиков:*

- Гайдукову Александру Олеговичу – президенту Группы компаний «Страна Девелопмент».

*Среди генподрядных организаций численностью свыше 300 человек:*

- Щепелину Николаю Игнатьевичу – генеральному директору АО «Тюменская домостроительная компания»;
- Руссу Николаю Александровичу – генеральному директору АО «Мостострой-11»;
- Мурзину Михаилу Николаевичу – генеральному директору ООО «Запсибгазпром-Газификация».

*Среди генподрядных организаций численностью до 300 человек:*

- Низамовой Елене Валериевне – генеральному директору общества с ограниченной ответственностью «ЭНКО ГРУПП».

*Среди проектных организаций:*

- Табанакovu Андрею Владимировичу – директору ООО «Мастерская архитектора Табанакова А. В.».

*Среди организаций, осуществляющих поставку строительных материалов и оказывающих услуги:*

- Захарову Андрею Григорьевичу – директору ООО «Оконные системы ТДС».

*Среди организаций промышленности строительных материалов численностью свыше 300 человек:*

- Саммасову Риволю Фердаусовичу – генеральному директору ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия».

*Среди организаций промышленности строительных материалов численностью до 300 человек:*

- Бойко Татьяне Васильевне – генеральному директору ООО «Сибжилстрой».

## **В номинации «Руководитель года» дипломы лауреата конкурса присуждены:**

*Среди организаций-заказчиков:*

- Водопьянову Юрию Леонидовичу – генеральному директору ООО «Запсибгазпром».

*Среди организаций промышленности строительных материалов численностью свыше 300 человек:*

- Жалнину Денису Викторовичу – генеральному директору ООО «Винзилинский завод керамических стеновых материалов».

## **В номинации «Объект года» диплом победителя конкурса присужден:**

*А. Новое строительство*

*Среди организаций-заказчиков:*

- ГКУ ТО «УКС» – строительство школы в районе сквера «Комсомольский» по ул. Московский тракт, г. Тюмень;
- ООО СЗ «СТРАНА ЗАПАД» – ЖК «Домашний», дом «Сибирский», г. Тюмень.

*Среди генподрядных организаций численностью свыше 300 человек:*

- АО «Тюменская домостроительная компания» – дом комфорт-класса «Бриллиант» в жилом районе «Ново-Патрушево», г. Тюмень;
- АО «Мостострой-11» – строительство школы в районе сквера «Комсомольский» по ул. Московский тракт, г. Тюмень.

*Среди генподрядных организаций численностью до 300 человек:*

- ООО «СЗ «ЭКО-город» – жилой комплекс «Ритмы», первая очередь, г. Тюмень, ул. Бульварная;
- ООО «СЗ «Тюменская строительная компания ЭНКО» – жилой район «Никольский», Тюменский район, д. Патрушева.

## **В номинации «Объект года» диплом лауреата конкурса присужден:**

*А. Новое строительство*

*Среди организаций-заказчиков:*

- ОАО «Запсибгазпром» – Соколиный центр «Камчатка» (вольеры для молодняка), Камчатский край, Мильковский район;
- ООО «СЗ «Юпитер» – жилой комплекс «House-club» в п. Московский дворик Тюменского района;
- ООО «СЗ «СИУТР-СК» – жилой квартал «Парковый»;
- ООО «Гарантия» – теннисный центр «Лидер», г. Тюмень, ул. Народная, 72.

*Среди генподрядных организаций численностью свыше 300 человек:*

- ООО «Запсибгазпром-Газификация» – д/с, Архангельская область, г.о. Новая Земля, р. п. Белушья Губа, ул. Фомина, здание 5.

**Б. Благоустройство**

*Среди организаций-заказчиков:*

- Управе Калининского административного округа Администрации г. Тюмени – озелененная зона общественного пространства на пересечении ул. Таврическая и ул. Белинского в г. Тюмени (Сквер «Юристов»).

**В номинации «Проект года» диплом победителя конкурса присужден:**

*А. Лучший архитектурный проект жилищного назначения*

*Среди организаций-заказчиков:*

- ООО «СЗ «Меридиан Констракшн Тюмень» – жилой комплекс «Меридиан Запад», г. Тюмень, ул. Краснооктябрьская.

*Среди генподрядных организаций численностью до 300 человек:*

- ООО «СЗ «ЭКО-город» – жилой комплекс «Ритмы» (ГП-5), г. Тюмень.

**Б. Лучший архитектурный проект общественного назначения**

*Среди проектных организаций:*

- ООО «Мастерская архитектора Табанакова А.В.» – стена «Город трудовой доблести» с благоустройством прилегающей территории, г. Тюмень;
- АО «Институт Тюменьгражданпроект» – спортивный комплекс «Центр гимнастики», г. Тобольск.

**В номинации «Продукт года» диплом победителя конкурса присужден:**

*Среди организаций промышленности строительных материалов численностью свыше 300 человек:*

- ООО «СЗ «Завод железобетонных изделий-3» – НСП 90.33-Ок: 9-метровая трехслойная наружная стеновая панель;
- ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» – кирпич силикатный утолщенный лицевой пустотелый «слоновая кость».

**В номинации «Продукт года» диплом лауреата конкурса присужден:**

*Среди организаций промышленности строительных материалов численностью свыше 300 человек:*

- ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» – перемычки армированные керамзитополитиролбетонные;
- ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» – смесь сухая строительная шпатлевочная на известковом вяжущем.

*Среди организаций промышленности строительных материалов численностью до 300 человек:*

- ООО «Сибжилстрой» – фасадная цементно-стружечная плита 600×300×24 ГОСТ 26816-2016

**В номинации «Технология года» диплом победителя конкурса присужден:**

*Среди научно-производственных организаций:*

- ООО Научно-производственное объединение «Фундаментстройаркос» – блочные компрессорно-конденсаторные агрегаты для замораживания многолетнемерзлых грунтов оснований фундаментов в летний период.

*Среди организаций-заказчиков:*

- ООО «СЗ «СТРАНА ЗАПАД» – поточный метод организации строительства.

**В номинации «Развитие населенных пунктов» диплом победителя конкурса присужден:**

*А. Проектирование*

*Среди проектных организаций:*

- ООО «Геопроект» – жилой район «Губернаторский», территория планировочного района № 14 «Мысовский» в районе ул. Тобольский тракт.

**Б. Новое строительство**

*Среди специализированных электромонтажных организаций до 300 человек:*

- ООО «ДСК-Энерго» – строительство сетей электроснабжения в жилых районах «Ново-Комарово» и «Ново-Патрушево», Тюменский район Тюменской области.

*Среди генподрядных организаций численностью до 300 человек:*

- ООО «СЗ «ЭКО-город» – жилой комплекс «Ритмы», г. Тюмень, ул. Бульварная.

*Среди организаций-заказчиков:*

- ООО «Гарантия» – теннисный центр «Лидер», г. Тюмень, ул. Народная, 72.

**В номинации «Развитие населенных пунктов» диплом лауреата конкурса присужден:**

**В. Благоустройство**

*Среди специализированных электромонтажных организаций свыше 300 человек:*

- АО «Сибирско-Уральская энергетическая компания» – световая конструкция «Папа Миша», г. Тюмень, ул. Первомайская, 20.

**В номинации «Лучший застроенный микрорайон» диплом победителя конкурса присужден:**

*А. Многоэтажная комплексная застройка*

*Среди организаций-заказчиков:*

- ООО «СЗ «Строительство Бизнес Коммерция» – ЖК «Акватория» (II очередь: г. Тюмень, 4 МКД по ул. Павла Никольского);

*Б. Малоэтажная комплексная застройка*

*Среди генподрядных организаций численностью до 300 человек:*

- АО «СЗ «Партнер-строй» – ЖК «Ожогино» (ГП-6), г. Тюмень, ул. Владимира Полякова.

**В номинации «Лучший застроенный микрорайон» диплом лауреата конкурса присужден:**

*А. Многоэтажная комплексная застройка*

*Среди организаций-заказчиков:*

- ООО «СЗ «Меридиан» – жилой квартал «Первая линия. Пляж», г. Тюмень, 7 МКД по ул. Героев Сталинградской битвы;
- ООО «СЗ «ПИК-Тура» – жилой квартал «Озерный парк», корпуса 2Б и 3А, г. Тюмень, ул. Комбинатская, 60.

*Б. Малоэтажная комплексная застройка*

*Среди организаций-заказчиков:*

- ООО «СЗ «Навигатор. Строительство» – ЖК «Зеленые аллеи» (ГП 59-6Б, ГП 64-10, ГП 78-8, ГП 91-6Б, ГП 122-2). Жилой квартал по ул. Владимира Полякова, г. Тюмень.

*Звание «Элита строительного комплекса Тюменской области» присуждено:*

- АО «Тюменская домостроительная компания»;
- АО «Мостострой-11»;
- ООО «СЗ «Завод железобетонных изделий-3»;
- ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия»;
- ООО «ЭНКО ГРУПП»;
- Строительному институту ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет».

Подписной индекс журнала "Архитектура, строительство, транспорт"  
в объединенном каталоге «Пресса России» 79619 ([www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru))

